مختصر العلوم الهندسية

الجزء الثالث

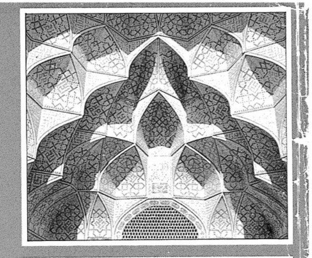
التحليل الإنشائي

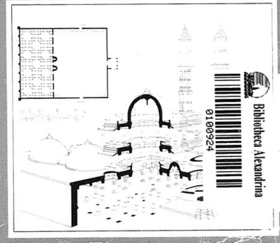
لمختلف أنواع الطرز والعناصر الإنشائية الحاملة

إعداد المهندس المعمار

عماد تنبكجي









مختصر العلوم الهندسية
الجزء الثالث

التحليل الإنشائي لمختلف الطرز والعناصر الإنشائية الحاملة

- التحليل الإنشائي للعناصر الإنشائية الحاملة.
- التحليل الإنشائي لمختلف أنواع الجمل الإنشائية المعروفة.
- تعاريف أساسية وجداول حساب معيارية.

اعداد المهندس
عماد محمد عدنان تنبكجي



الطبعة الاولى
١٩٨٨

سلسلة : مختصر العلوم الهندسية (٣)

الكتاب : التحليل الإنشائي لمختلف الطرز
والعناصر الإنشائية الحاملة

اعداد : المهندس عماد عدنان تنبكجي

الطابع : مطبعة الشام
عدد الطبع : ٢٠٠٠ نسخة
الناشر : دار دمشق للطباعة والنشر والتوزيع
دمشق ـ سوريا : شارع بور سعيد هاتف: ٢١١٠٢٢ ـ ٢١١٠٤٨ ص.ب
٥٣٧٢ تلكس ٤١٢٥٣٨ زينه

● المقدِّمة :

لقد كان للتطوُّر العلمي والتكنولوجي ، أثره على تطوير العلوم الهندسيّة . فبعد أن كانت الحسابات ، تعتمد على قواعد رياضيّة بسيطة ، أخذت تعرف نظريّات حديثة ، تعتمد أساليب في التحليل الإنشائي ، تستند أساساً ، على ما استجدّ من قواعد وقوانين رياضيّة . لقد ساهمت المصفوفات كما سنرى ، على تبسيط حسابات التحليل الإنشائي ، كما ساهم الحاسوب أخيراً ، وبرامجه المتعدِّدة ، في حلّ الكثير من المنشآت المعقّدة ، وبشكل أقرب ما يكون إلى الكمال ، والدقّة الكاملة .

يبحث الجزء هذا ، في الأساليب المتّبعة لتحليل مختلف عناصر المنشأة الحاملة ، الواقعة فوق منسوب الأرض الطبيعيّة .

ابتدأنا الجزء هذا ، وفي فصله الأوّل ، بالتحليل الإنشائي للجسور الحاملة ، المقرّرة توازنياً ، والموثوقة من طرفيها . كما تناولنا بالحساب والتحليل ، الدعمات الإنضغاطيّة ، والأعمدة جزءاً منها .

انتقلنا في الفصل الثاني ، لدراسة كافة الجمل الإنشائية المعروفة ، ابتداء من الجمالونات المستويّة الأطر الفراغيّة ، وأطر الوصلات الصلدة ، مروراً بالجسور المستمرّة ، الإطارات الحاملة ، والمنشآت السطحيّة ، منتهين بحساب وتحليل المنشآت الخاضعة لقوى شد صرفة .

تناول الفصل الثالث ، التعاريف والمصطلحات الأساسيّة ، التي مرّت بنا ، أثناء تناولنا لأبحاث الجزأين الثاني والثالث . إضافة إلى احتواء الفصل لجداول وحسابات توضيحية ، ، تناولنا فيها ، ومن خلال جداول جاهزة ، أنواعاً شتّى من الجسور الحاملة .

الفصل الأول

التحليل الإنشائي للعناصر الإنشائيّة الحاملة

● المقدمة :

ستتناول في هذا الفصل ، بالدرس والتحليل ، عنصرين هامين من العناصر الإنشائيّة الحاملة ، أولها الجسور ، وثانيها الدعامات الإنضغاطيّة ، بما فيها الأعمدة .

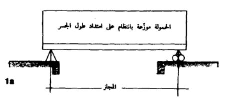




● الجسور

1.01– : الجسور إما عناصر مقرّرة سكونيّاً ، أو عناصر غير مقرّرة سكونيّاً . تكون الجسور مقرّرة سكونيّاً ، إذا أمكن التوصّل من خلال نظريّات التوازن فقط ، إلىٰ تحديد عزوم الإنعطاف ، وقوىٰ القص المؤثّرة عليها . سنتناول أولاً الجسور المقرّرة سكونيّاً ، بينما سنعالج الجسور غير المقرّرة سكونيّاً ، في الفقرة (1.24) .

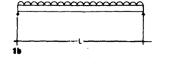
1.02– : إنّ الجسور المقرّرة سكونيّاً ، هي جسور إما استنادها بسيط ، أو علىٰ شكل جسور ظفريّة .



الشكل (١ ـ ١ ـ آ) : نفترض أنّ المسند في كل طرف عبارة عن مفصلة تامة وإنّ الطرف الأيمن يمكنه التحرُّك أفقياً .

* الجسور ذات الإستناد البسيط :

1.03– : نرىٰ توضيحاً للجسور ذات الإستناد البسيط ، في الشكل (١ ـ ١ ـ آ) . إنّ الحالة هذه تفترض ، استناد كل طرف من طرفي الجسر ، علىٰ مسند بسيط ، علىٰ شكل مفصل كامل ، علىٰ أن يكون أحد هذين المسندين ، حرّاً أيضاً ، لكي يتسنّىٰ للجسر التحرُّك أفقيّاً . . يمكننا تمثيل الجسر هذا بحمولته ، كما هو موضح في الشكل (١ ـ ١ ـ ب) . إنّ مجموعة الحالات والظروف المثاليّة هذه ، نادراً ما نجد لها مثيلاً علىٰ أرض الواقع . إلا أنّ هناك ضرورة ، تدعونا لتبنّي مجموعة الإفتراضات هذه ، لكي يمكننا أن نصل من خلالها ، إلىٰ نظريّة عمليّة قابلة للتطبيق .



الشكل (١ ـ ١ ـ ب) : يوضّح الشكل الطريقة الإعتبارية المتبعة لتوضيح الجسر الموضح في الشكل (١ ـ ١ ـ آ) ، كما يظهر طريقة التعبير عن الحمولة الموزّعة بانتظام .

الشكل (١ ـ ١) : يوضّح الشكل جسراً بمسند بسيط .

1.04- : لنفترض أنّ المسافة ما بين محوري مسندي الجسر ، تساوي «L» ، وإنّ الجسر خاضع لحمولة واحدة أو أكثر . تندرج الحمولات نظريّاً ، ضمن أنواع ثلاثة :

١) ـ حمولات مركزّة يرمز لها بـ (P) .

٢) ـ حمولات موزّعة بانتظام ويرمز لها بـ (W أو w) .

٣) ـ حمولات موزّعة بشكل عشوائي .

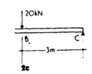
1.05- : يفترض بالحمولات المركزّة ، أن تعمل في نقطة بعينها . لكن عمليّاً ، يوجد لنقطة التأثير دوماً ، امتداد ولو قصير . مثال ذلك ، ما نشاهده في الأبنيّة ، حيث يمكن تحميل عمود على جسر ، فتكون قاعدة العمود ، هي مجاز تأثير الحمولة ، أنظر الشكل (٢ ـ ١ ـ آ) . تمثّل الحمولة ، كما هي في الشكل (٢ ـ ١ ـ ب) ، لكي يسهل علينا إجراء الحسابات .

1.06- : تولّد القوّة المركزة في النقطة (B) ، في الشكل (٢ ـ ١ ـ ب) ، ردي فعل في النقطتين (C,A) ، يرمز لهما كما هو موضّح بالشكل بالرمزين (Rc,Ra) . تؤخذ عزوم مجموعة القوى حول النقطة (A) :

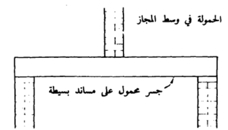
(ينبغي أن يساوي مجموع عزوم القوى هذه صفراً ، لكي تظل الجملة في وضعيّة توازن)

$$20000 \times 3 - Rc \times 6 = 0$$

$$Rc = 10000\,N = 10\,KN$$



الشكل (٢ ـ ١ ـ جـ) : يوضّح الشكل الأبعاد المستخدمة في حساب عزم انعطاف نقطة تأثير القوّة المركزة .



الشكل (٢ ـ ١ ـ آ) : يظهر الشكل جسراً ذي مسند بسيط معرّض لحمولة مركّزة تقع في وسط المجاز .

1.07- : لنتخيّل الآن . أنّ الجسر قد اقتطع عند النقطة (B) مباشرة ، وهي نقطة تطبيق الحمولة . تنقسم الحمولة المطبّقة على نصفي الجسر بالتساوي ، وبهذا يصبح رد الفعل عند النقطة (C) هو :

$$Rc = 10\ KN$$

وعندها تصبح قوّة القص تساوي عند النقطة (B) :

S_b

ويكون عزم الإنعطاف عند النقطة (B) : $\mathcal{M}_b$

1.08- : تدرس القوى هذه ، المؤثّرة على جزء من الجسر ، الواقع مابين نقطة القطع والنقطة «c» ، تحت ضوء كون جزء الجسر هذا ، جزءاً متوازناً .

وذلك بتحليل القوى على محور شاقولي أنظر الشكل (٢ ـ ١ ـ ب) .

$$S_b - R_c = 0$$

وذلك بأخذ العزوم حول النقطة (B) ، أنظر الشكل (٢ ـ ١ ـ جـ) .

$$\mathcal{M}_b - R_c = 0$$

لهذا :

$$S_b - 10 = 0$$

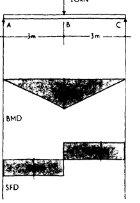
$$S_b = 10\ KN$$

و :

$$\mathcal{M}_b - 10 \times 3 = 0$$

$$\mathcal{M}_b = 30\ KNm$$

1.09- : يمكننا الآن ، وبعد أن قمنا بإجراء الحسابات ، رسم مخطط القص (SFD) ، ومخطط عزم الإنعطاف (BMD) ، أنظر الشكل (٢ ـ ١ ـ ب) .



الشكل (٢ ـ ١ ـ ب) : يوضّح الشكل التمثيل التخطيطي للجسر ، كما يظهر طريقة تمثيل ردود الأفعال المتولّدة عند النقطتين (C , A) وكذلك طريقة التعبير عن الحمولة المركّزة المساوية لـ (20 KN) والمؤثّرة في النقطة (B) . يظهر الشكل أيضاً مخططي العزم والقص .

1.10- : خضع الجسر الموضّح في الشكل (٣ ـ ١) ، لحمولة موزّعة بانتظام ، بمعدّل (1.5KN/m) ، على امتداد مجاز مسافته (١٠) أمتار . يمكن لإجراء الحسابات ، تطبيق القواعد السابقة ، كما يمكن استغلال التناظر في توزيع القوى ، لاستنتاج قيم ردود الفعل .

$$Ra = Rc = \frac{1.5 \times 10}{2} = 7.5 \text{ KN}$$

1.11- : يمكننا حساب مقدار عزم الإنعطاف في النقطة «B» ، الواقعة في وسط المجاز ، بنفس الطريقة ، أنظر الشكل (٣ ـ ٣ ـ ب) :

$$M_b - R_c \times 5 + 1.5 \times 5 \times 2.5 = 0$$

إنّ محصّلة القوى الموزّعة بانتظام ، والموزّعة على نصف مجاز الجسر ، تعمل في مركز ثقل الحمولة الموزّعة بانتظام ، والمؤثّرة على نصف المجاز فقط ، أي أنّها تؤثّر في نقطة واقعة في ربع المجاز ، أو في مثالنا ، عند نقطة تبعد عن النقطة (C) ، مسافة قدرها (2,5) م :

$$M_b = 37.5 - 18.75 = 18.75 \text{ KNm}$$

1.12- : تحسب قوّة القص عند النقطة (b) ، بتطبيق العلاقة التالية :

الشكل (٣ ـ ١ ـ ب) : يوضّح الشكل الأبعاد المستخدمة لاستنباط عزم الإنعطاف الأعظمي وهو العزم الخاص بنقطة تقع في وسط المجاز .

$$S_b = R_c - 1.5 \times 5 = 0$$

أو

$$S_b = 7.5 - 7.5 = 0$$

يوضّح الشكل (٣ ـ ١ ـ آ) مخطّط العزم (BM) ، ومخطّط القص (SF) . .

الشكل (٣ ـ ١ ـ آ) : يوضّح الشكل جسراً محمولاً على مسندين بسيطين ومحمّلاً بحمولة موزّعة بانتظام ، كما يظهر الشكل مخطّط العزم ومخطّط قوى القص .

1.13 : تشير الأمثلة هذه ، إلى الطرق المتّبعة لحل المسائل ، اعتماداً على المبادىء الأوليّة . يمكن أن نحصل على الصيغ المعياريّة ، من جداول أعدّت لهذه الغاية ، أنظر الفصل الثالث من الجزء الثالث ، اللوحة (١) . كما استخدمت في اللوحتين (٢و٣) ، العلاقة $\frac{WL}{4}$ و $\frac{WL^2}{8}$ ، حسب مقتضى الحال ، مع ملاحظة أن (W أو w) ، تعني الحمولة المطبّقة ، و«L» تعني طول المجاز .

حمولة موزّعة بانتظام　حمولة مركّزة

جسر ظفري

4a

الشكل (٤ - ١ - آ) : يظهر الشكل جسراً ظفرياً محمّلاً بقوى موزّعة بانتظام وخاضعاً أيضاً عند نهايته الطرفيّة إلى قوّة مركّزة .

حمولة موزّعة بانتظام تساوي (4KN×3)　10kN

Ra　1.5m　3m

4c

الشكل (٤ - ١ - جـ) : يظهر الشكل الأبعاد المستخدمة في حساب مخططي العزم وقوى القص .

* الأظفار :

1.14 : إنّ الجسر الممتد ، والموثوق من الطرف اليساري ، الموضّح في الشكل (٤ - ٣) ، يتعرّض لأوزان محمولة على الوثاقة (A) ، المتواجدة على الطرف اليساري للجسر ، حيث يتولّد رد الفعل (Ra) ، وعزم التثبيت الطرفي (Ma) . يصاغ الطرف اليساري (A) ، على شكل وثاقة ، أو على شكل جزء مدفون ضَمن الجدار .

1.15 : يمكن ببساطة إجراء الحسابات الكفيلة باستنتاج رد الفعل (Ra) ، والعزم (Ma) ، استناداً إلى قوانين ومفاهيم التوازن .

نلحظ في المثال الموضّح في الشكل (٤ - ١) ، أنّ التحليل الشاقولي يعطينا العلاقة التالية :

$\Leftarrow Ra-4\times3-10=0$

$Ra=22$ KN

أخذنا للعزم حول النقطة (A) ، تعطينا العلاقة التالية :

$\Leftarrow \mathcal{M}-4\times3\times1.5-10\times3=0$

$\mathcal{M}a=48$KNm

* تشوُّهات الجسور :

-1.16 : تحسب أيضاً الإجهادات ضمن مادة الإنشاء ، لكي نستطيع التنبؤ بحركة المنشأة . نجري بعدئذ تقييم لحركة كل عنصر من عناصر المنشأة على حدى . يمكن لكل عنصر من العناصر المكوَّنة للمنشأة ، التحرُّك وفق شكل من الأشكال الثلاثة التالية :

أ ـ يمكن للعنصر أن يستطيل أو يتقلّص ، نتيجة تولُّد ردود فعل داخليّة ، تقابل بها المادة إجهادات ، تتلقّاها بشكل مباشر . وتحسب ردود الفعل الداخليّة هذه ، الممثّلة بحركة العنصر ، من العلاقة التالية :

التشوُّه = الطول × قيمة الإنفعال ⇐

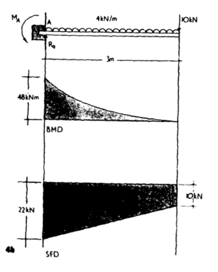
التشوُّه = الطول×الإجهاد / عامل يونغ (E) .

حيث «E» عامل المرونة المسمّى عامل يونغ .

٢ ـ يمكن للعنصر أيضاً أن ينحني .

٣ ـ يتعرّض العنصر أيضاً لعزوم وقوى فتل .

-1.17 : إنّ انحناءات العناصر ، تشوُّهات يصعب حسابها ، خصوصاً عندما تكون تلك التشوُّهات ، ناشئة عن إجهادات لا تتوزَّع بانتظام ، على كامل طول العنصر المدروس ، مما يدعونا إلى استخدام قوانين التفاضل والتكامل ، لمعرفة شكل وقيم انحناءات مختلف نقاط العنصر هذا .



الشكل (٤ ـ ١ ـ ب) : يظهر الشكل مخططي العزم وقوى القص .

هناك نظريّتين ، نستطيع بهما حساب وحلّ المشاكل البسيطة ، لظاهرة انحناءات العناصر ، بحيث تبتعدان بنا ، عن استخدام قوانين رياضيّة معقّدة . على أيٍّ حال ، هناك براهين تثبت القوانين المدرجة فيما يلي ، إلّا أننا هنا ، سنقبلها كما هي دون برهان ، لعدم حاجة المعماري ، إلى تفاصيل البراهين وتعقيداتها .

ـ النظرية الأولى :

1.18- : إنّ التغيرّ الحاصل في الجسر ، على مدى طول معطى ، يساوي مساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$)

والذي يساوي : $\frac{\text{عزم الإنعطاف}}{\text{عامل يونغ} \times \text{عزم العطالة}}$

على ذاك الطول .

ـ النظرية الثانية :

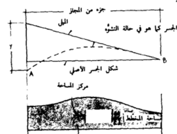
1.19- : إنّ المسافة الشاقوليّة (y) ، التي مبتدؤها النقطة (A) ، الواقعة أسفل المماس عند «B» ، تساوي عزم مساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) ، المرسوم على القطعة (AB) ، مأخوذاً حول النقطة (A) .

الشكل (٥ - ١ - ب) : يشرح الشكل النظريّة الثانية ويوضّح أنّ مسافة التشوّه الحاصل في جزء من مجاز يساوي عزم مساحة المخطّط $\frac{M}{EI}$ أي :

$$y = x' \times \text{مساحة المخطّط } \frac{M}{EI}$$



الشكل (٥ - ١ - آ) : يشرح الشكل مدلول النظريّة الأولى و يوضّح أنّ تغيّر الميل يساوي مساحة المخطط $\frac{M}{EI}$. وهذا صحيح سواء أكان التغيرّ على جزء من المجاز أو على كامل طول المجاز .

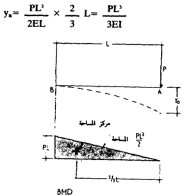


1.20- : في معظم الحالات ، تكون مادة الإنشاء متجانسة ، وبالتالي عامل يونغ ، واحداً في كافة نقاط العنصر ، وكذلك يكون مقطع العنصر ثابتاً ، على كامل طول العنصر ، وبالتالي يكون عزم العطالة (I) ، واحداً لكافة نقاط العنصر .

من كل هذا نستنتج ، أنّه يمكن أن يحلّ مخطط عزم الإنعطاف ، محل المخطّط الممثّل للمساحة ($\frac{M}{EI}$) . ويبقى العامل «EI» ، ضرورياً فقط لحساب قيم التشوّه أو زوايا الميول .

1.21- : لتوضيح كيفية تطبيق النظريّتين هاتين ، نتابع المثال الموضّح في الشكل (٦ ـ ١) . إن مخطط عزم الظفر ، الموضّح في الشكل (٦ ـ ١) ، هو مثلث مساحته ($\frac{P\ell^2}{2}$) ، وابتعاد مركز ثقل المساحة هذه ، عن النقطة (A) ، يساوي ($\frac{2}{3}L$) . إن الجسر الظفري ، هو جسر أفقي ، عند النقطة (B) ، لذا كان المماس المار من النقطة(B) ، أيضاً خطاً أفقياً . وبالتالي كان التشوّه عند (A) ، الممثّل بالطول (y_a) يساوي لعزم مساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) ، حول النقطة (A) .

$$y_a = \frac{PL^2}{2EL} \times \frac{2}{3} L = \frac{PL^3}{3EI}$$



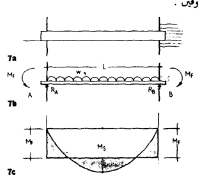
الشكل (٦ ـ ١) : إنّ مسافة التشوّه في جسر ظفري (y_a) يساوي لـ ($\frac{PL^3}{3EI}$) هذا يعني أنّه يساوي العزم الأوّل لمساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) حول (A) .

- **1.22** : عمليّاً ، يوضع الجسر الظفري غالباً ، عند نهاية امتداد جسر مستمر ، لذا لا يكون الجسر عند النقطة (B) ، جسراً أفقياً ،وبالتالي يزداد التشوُّه عند النقطة (A) ، بازدياد زاوية الميل عند النقطة (B) ، وهي التي تحسب مضروبة بالطول «L» .

- **1.23** : إنّ تشوُّهات الجسور ، لا تحسب استناداً إلى القواعد والقوانين البسيطة هذه ، وذلك ناشيء من أنّ الجداول المعياريّة ، للعناصر المقرّرة سكونيّاً ، غالباً ما تعطينا الحمولات المناسبة للجسور ، والكفيلة بعدم إحداث تشوُّهات بها . لذا كان الإستخدام الحقيقي ، لنظريّات حساب الميول والتشوُّهات ، يكمن في المنشآت غير المقرّرة سكونيّاً .

* الجسور موثوقة الطرفين :

- **1.24** : إنّ الشكل البسيط للمنشأة غير المقرّرة سكونيّاً ، هي الجسر الموثوق من طرفيه ، أنظر الشكل (٧ - ١) . إنّ الجسر المقرّر سكونيّاً ، هو الجسر المستند على مسندين بسيطين ، أو ذاك الموثوق من طرف واحد . في الجسور الموثوقة من طرف واحد ، هناك عزم إضافي واحد ، يتولّد عند الوثاقة ، لذا يعود الجسر ليصبح مقرّراً سكونيّاً ، إن أزيلت وثاقته الثانية . إذاً يتولّد في الجسور موثوقة الطرفين ، عزم إضافي عند كل طرف من طرفيها الموثوقين .



الشكل (٧ - ١ - آ) : **يظهر الشكل أحد أشكال الجسور موثوقة الطرفين .**

الشكل (٧ - ١ - ب) : **يوضّح الشكل بمخطط العزم المسرود في الفقرة** (1.25)

عزم المسند الحر = M_s

عزم الطرف الموثوق = $M_F = \dfrac{WL^2}{12}$

- 1.25 : تتخذ عزوم الإنعطاف ، في الجسور موثوقة الطرفين ، شكلين أساسيين :

١ ـ عزم انعطاف المسند الحر «M_s» ، والذي يحدث على جسر مكافىء مقرّر سكونيّاً .

٢ ـ عزم انعطاف الطرف الموثوق «M_F» وهو عزم يتخذ خطاً مستقيماً ، ممتداً على طول الجسر . يتحدّد مقدار العزم هذا ، بمقدار العزم عند كل طرف .

لنستفد من المعادلة المحدِّدة لقيمة ميل الجسور ، .

وهي هنا تساوي صفراً ، لخلو الجسور الموثوقة من طرفيها ، من أمثال التشوُّهات هذه ، لذا كانت قيمة مساحة مخطّط التشوُّه $\frac{M}{EI}$ تساوي صفراً .

إنّ مساحة مخطّط عزم انعطاف المسند الحر ، مساو ومعاكس في الإشارة ، لمساحة مخطّط عزم انعطاف الطرف الموثوق .

نتيجة لكون الجسر متجانس ومتناظر ، فإنّ العزم عند الطرف الموثوق الأوّل ، مساو للعزم عند الطرف الموثوق الثاني ، وبذا تكون مساحة مخطّط عزم الطرف الموثوق تساوي (M_FL) .

من كل ما سبق نستنتج أنّ :

$$M_FL = \frac{2}{3} M_SL \Rightarrow$$

(لكون مساحة عزم الإنعطاف هي مساحة قطع مكافىء ، وبالتالي تساوي (٢/٣) مساحة المستطيل المحيط مماساً له) .

$$MF = \frac{2}{3} \frac{W\ell^2}{8} = \frac{W\ell^2}{12}$$

*** مثال يتضمّن تحليلاً إنشائياً لظفر محمول على مسند :**

- 1.26 : يظهر الشكل (٨ ـ ١) ، مخطّطاً توضيحيّاً للجسر هذا .

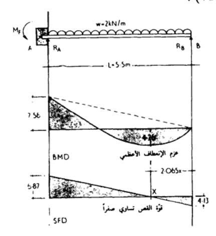
- 1.27 : نحسب أولاً قيمة العزم «M_F» . إنّ خط المماس عند النقطة (A) ، هو خط أفقي ، وذلك لكون النقطة (B) ، نقطة محمولة على مسند داعم ، لذا لا توجد مسبِّبات ، تدعو إلى تشوُّه الجسر ، وبالتالي فإنّ عزم مساحة مخطّط التشوُّه ، حول النقطة (B) ، يساوي صفراً . أي :

$$M_F \times \frac{L}{2} \times \frac{2}{3} L = \frac{2}{3} \times \frac{WL^2}{8} \times L \times \frac{L}{2}$$

حيث :

$$M_F \times \frac{L}{2}$$

مساحة المثلث المتشكِّل ما بين «R_A» و «R_B» ، الموضّح منقّطاً على مخطّط عزم الإنعطاف في الشكل (٨ ـ ١) .



الشكل (٨ ـ ١) : يوضِّح الشكل مخططات جسر موثوق من طرف ومحمول من الطرف الآخر ، وهو توضيحاً لما جاء في الفقرات ابتداء من الفقرة (1.26) إلى الفقرة (1.33) . لنلاحظ أنّ العزم الأعظمي يقع في نقطة تكون فيها قوى القص تساوي صفراً .

المسافة المحصورة ما بين (R_B) وبين مركز ثقل $= \frac{2}{3} L$ المساحة هذه

مساحة القطع المكافىء وهي المساوية لثلثي مساحة $= \frac{2}{3} L \times \frac{W L^2}{8} \times L$ المستطيل المحيط بالقطع المكافىء هذا.

المسافة المحصورة ما بين مركز ثقل مساحة القطع $= \frac{\ell}{2}$ المكافىء وبين النقطة (R_B).

$$MF = \frac{W \ell^2}{8} = \frac{2 \times (5.5)^2}{8} = 7.56 \text{ KNm.}$$

1.28 - : تحسب ردود الفعل الشاقولية (R_B , R_a)، المتولّدين عند طرفي الجسر، بأخذ العزوم حول كل طرف على حدى.

نأخذ العزوم حول «A»:

$$R_B \times L + M_F\ 0.002 \quad \frac{W \ell^2}{2} = 0$$

ينبغي أن تساوي مجموع العزوم صفراً، لكون المنشأة متوازنة

$$R_B = \frac{2 \times 5.5}{2} = \frac{7.56}{5.5} \Rightarrow$$

$$R_B = 5.5 - 1.37 = 4.13 \text{ KN.}$$

نأخذ العزوم حول (B):

$$R_A \times L - M_F - \frac{W \ell^2}{2} = 0$$

$$R_A = 5.5 + 1.37 = 6.87 \text{ KN.}$$

نتحقّق من صحّة النتائج، باسقاط القوى على محور شاقولي، فنجد أن:

$$4.13 + 6.87 - 2 \times 5.5 = 0$$

من المعادلة نجد أن محصِّلة القوى، على محور شاقولي يساوي صفراً، وهذا محقِّق لنظريّة التوازن.

1.29 - : إنّ حساب قيمة العزم الموجب الأعظمي، المتواجد على نقطة من مجاز الجسر، هي من العمليّات الحسابيّة السهلة، وذلك نتيجة لكون النقطة ذات العزم الأعظمي، يقابلها قوّة قص تساوي صفراً (إثبات ذلك، يتضمّن حسابات لن ندخل فيها، لعدم حاجة المعماري إلى معلومات تفصيليّة).

- 1.30 : لنفترض أنّ النقطة التي فيها قوى القص تساوي صفراً ، تبتعد مسافة تساوي (x) متراً ، عن النقطة «B» ، مقاسة على محور يتجه باتجاه «A» . لنحلِّل القوى الشاقوليّة ، المؤثِّرة على القطعة (XB) :

$$W \times x - R_B - S_x = 0$$

حيث :

هي قوّة القص عند النقطة (x) S_x :

ولكن : $S_x = 0$ ، إذ أنّ «x» هي المسافة المحدَّدة لبعد نقطة ، قوّة القص عندها تساوي صفراً .

لذا تكون «x» هي :

$$x = \frac{R_B}{W} = \frac{4.13}{2} = 2.065 \text{ m.}$$

نأخذ عزوم القوى المنتشرة على القطعة «XB» ، حول «B» :

$$M_x - \frac{Wx^2}{2} = 0$$

حيث :

عزم الإنعطاف عند «x» . $M_x =$

$$M_x = \frac{2 \times (2.065)^2}{2} \approx 4.26 \text{ KNm.}$$

- 1.31 : لنحسب الآن الإجهادات الأعظميّة في الجسر . لنفترض أنّ مقطع الجسر هو مستطيل أبعاده (250 × 75) ملم . فيكون مساحة المقطع :

$250 \times 75 = 18750 \text{ m.m}^2$.

إنّ العزم الثانوي للمساحة «I» ، حول المحور الطبيعي هي :

$$\frac{bd^3}{12} = \frac{75 \times (520)^3}{12} = 98 \times 10^6 \text{ .mm}^4$$

من معادلات العزوم السابقة :

$$\frac{M}{I} = \frac{f}{y}$$

حيث :

$f =$ الإجهاد

$y =$ بعد الألياف النهائيّة عن المحور الطبيعي .

$$f = \frac{M}{I} y$$

إنّ القيمة العظمى للعزم «M» هو M_F ، والقيمة العظمى لـ «y» ، هي عند أعلى وأسفل المقطع .

تشتق وحدة الإجهاد ، من وحدات مكوِّنات علاقتها ، حيث تقاس مكوِّنات العلاقة بالوحدات التالية :

$$f = \frac{M(KNm)}{I(m.m^4)} \times y\,(m.m)$$

ينبغي توحيد الوحدات ، لكي يتسنّى حساب القيمة الصحيحة ، لذا نجري تحويلاً لقيمة وحدة العزم ، بضرب قيمتها بالعدد (10^3) ، لتتحوّل وحدة القوّة المقدّرة بـ (KN) إلى (N) ، فتصبح حصيلة العدد المضروب هي (10^6) . إذاً :

$$f_{max} = \frac{7.56 \times 10^6}{98 \times 10^6} \times 125 = 9.64\ N/mm^2 .$$

1.32 - : إنّ قوّة القصّ الأعظمية ، تقع عند النقطة (R_A) ، وتساوي (6.87 KN) ، أنظر الشكل (٨ ـ ١) .

إنّ إجهاد القص الأعظمي ، على المقطع ذي الشكل المستطيل ، يعادل مرّة ونصف ، الإجهاد الوسطي :

$$S_{max} = \frac{R_A}{\text{المساحة}\ (b \times d)} \times 1.5$$

$$S_{max} = \frac{6.87 \times 10^3}{18750} \times 1.5 = 0.55\ N/mm^2 .$$

1.33 - : من الصّعب حساب التشوُّه الأعظمي ، الناشيء عن تأثير الحمولة المطبّقة . إلّا أنّه يمكننا من الجداول ، معرفة قاعدة التشوُّه الأعظمي ، وهي تساوي $\frac{W\ell^4}{185\ EI}$ ، وبذا يمكن حساب التشوُّه الأعظمي للمادة ، بعد معرفة العامل (E) ، الممثِّل لعامل مرونة المادة ، المعروف بعامل يونغ ، وهي عوامل معلومة ، تنظِّمها جداول خاصة .

● العناصر الإنضغاطيّة :

ـ **2.01** : القوائم أو الدعمات الإنضغاطيّة ، هي عناصر إنشائيّة ، معرّضة بشكل خاص ، إلى قوى الضغط . غالباً ما تشير كلمة دعمات إنضغاطيّة ، إلى عناصر ليست بعناصر شاقوليّة ، وخاضعة لقوى ضغط معيّنة . بينما تسمّى الدعمات الإنضغاطيّة الشاقوليّة ، بالأعمدة ، الدعامات ، أو الأوتاد ، إذ يتحكّم باختيار اللفظة المناسبة ، نوعيّة المادّة المكوّنة للدعامة الإنضغاطيّة الشاقوليَّة . فالدعامات غالباً ما تصنّع من مواد معدنيّة ، بينما تصنّع وتشاد الأوتاد ، من مواد حجريّة أو بنائيّة .

ـ **2.02** : تعتمد نظريّة العناصر الإنضغاطيّة ، على مفهوم الإتزان اللامستقر . يوضّح الشكل (٩ ـ ١) ، مفهوم الإتزان اللامستقر ، حيث تذعن كافة القوى ، لمتطلّبات الإتزان ، إلا أنّ أيُّ تغيُّر ، في أيّة قوّة من القوى ، يؤدي إلى الإطاحة بنظام التوازن هذا .

الشكل (٩ ـ ١) : التوازن غير مستقر وإنّ أيّ تغيّر في تشكيلة المنظومة هذه ، سيكون مدعاة لإنهيار التوازن .

2.03 ـ : كل طرف من العنصر الإنشائي في الشكل (١٠ ـ ١ ـ آ) ، هو على شكل وصلة مسماريّة ، يمكنها التحرُّك فقط ، باتجاه طول العنصر . إذا بقي العنصر مستقيماً تماماً ، كان الإجهاد الواقع على العنصر ، إجهاد ضغط ليس إلا ، وقيمته تتحدّد بالعلاقة : $\frac{P}{A}$ حيث : قيمة الضغط = P ، مساحة المقطع = A . إذا تعرّض العنصر إلى انحناء بسيط ، أنظر الشكل (١٠ ـ ١ ـ ب) ، بحيث يتعرّض المحور الطولي لتشوُّه بسيط عند المركز ، مسافة هبوطه يساوي (y) ، فإنّ عزم الإنعطاف عند المركز سيصبح يساوي (PY) .

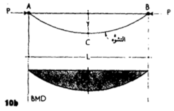
2.04 ـ : إنّ التحليل الدقيق للتشوُّه ، يتطلّب الإستعانة بقوانين التفاضل والتكامل ؛ إلا أنّ القاعدة التقريبيّة ، المدوّنة هنا ، يمكن لها أن تعطينا نتائج مشابهة ، أقرب ما تكون إلى الدقّة .

مقطع المساحة (A)

P P

10a

الشكل (١٠ ـ ١ ـ آ) : في الوصلات المسماريّة المعرّضة لضغوط ، يتم نقل الضغوط كما هي إلى الدعمة الإنضغاطيّة ، ولا يتحول جزء منها إلى أيّ شكل من أشكال القوى أو العزوم الأخرى .



الشكل (١٠ ـ ١ ـ ب) : إن تلقّت الدعمات قوى ضغط تشوّهت . وكان مقدار العزم الأعظمي يقع في الوسط وقيمته تساوي (P_y) .

الشكل (١٠ ـ ١) : يوضّح الشكل الضغوط الواقعة على دعمة انضغاطيّة .

إذا كان مخطّط تشوُّه الدعمة الإنضغاطيّة ، هو مخطّط لقطع مكافىء ، يطابق مسراه ، مسرى مخطّط عزم الإنعطاف ، فإنّ عزم أيّ نقطة (x) ، هو (Py) . من

النظريّة الثانية ، المنصوص عنها في الفقرة (1.19) ، يمكن تركيب علاقة المساواة ، التي تربط مسافة التشوُّه عند النقطة (B) ، الواقعة فوق مماس النقطة (C) مركز ثقل العنصر الإنشائي ، وبين العزم الأولي ، لمساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) ، الواقع على المحور (CB) ، والمحسوب حول النقطة (B) .

لهذا نجد أن :

$$y = \frac{2}{3} \times \frac{M_c}{EI} \times \frac{L}{2} \times \frac{5}{16} L = \frac{5}{48} M_c \times \frac{L^2}{EI}$$

لاحظ أنّ ($\frac{5}{16} L$) ، هي المسافة من (B) ، إلى مركز ثقل المقطع المأخوذ من القطع المكافىء .

الآن :

$$M_c = P \times y$$

لهذا تكون :

$$y = \frac{5}{48} \times \frac{PL^2}{EI} \times y .$$

من العلاقة هذه نرى إما :

$$y = 0$$

وبالتالي يمكن أن تأخذ العلاقة : $\frac{5}{48} \times \frac{PL^2}{EI}$ ، أيّة قيمة لها .

أو :

$$\frac{5}{48} \times \frac{PL^2}{EI} = 1$$

وبالتالي يمكن لـ «y» ، أن تأخذ أيّة قيمة لها . لهذا لا يوجد قيمة للإنحناء ، يمكن لنا تقديرها ، فيما لو تعرّضت الدعمة الإنضغاطيّة ، لقوى ضاغطة مقدارها (P) ، إلا إذا كانت قيمة القوّة مساوية لـ ($\frac{48 EI}{5 L^2}$) .

بعدئذ يأخذ تشوُّه مركز ثقل الدعمة الإنضغاطيّة يزداد بسرعة ، وتبدأ الدعمة الإنضغاطيّة بالتحدُّب . ($\frac{48}{5} = 9.6$) بينما تعطينا الحسابات الدقيقة ، معامل قريب يساوي (9.87) .

- **2.05** : يستحسن عند التصميم ، البعد عن تطبيق القوّة ، التي إن تجاوزناها ولو بقليل ، تتداعى الدعمة الإنضغاطيّة ، وتبدأ تشوُّهاتها بالتسارع . لذا ارتأى المصمِّمون ، تخفيض هذه القوّة إلى النصف ، تأكيداً للسلامة ، مما جعل القوّة الأعظميّة ، المسموح بتطبيقها على الدعمة الإنضغاطيّة تساوي :

$$\frac{48}{5} \times \frac{1}{2} \times \frac{EI}{L^2}$$

- **2.06** : إذا كان إجهاد الضغط يساوي «f_c» ، فإنّ :

$P = f_c \times A$.

وبالتالي :

$$F_{c\ max} = \frac{48}{5 \times 2} \times E \times \frac{I}{AL^2}$$

ونحن نعلم أنّ : $r^2 = \frac{I}{A}$ ، حيث «r» نصف قطر دوران المقطع .

إذاً :

$$f_{c\ max} = 4.8\ E\ (\frac{r}{L})^2$$

تدعى النسبة $\frac{L}{r}$ ، وهي مقلوب النسبة $\frac{r}{L}$ ، نسبة قصافة العنصر .

- **2.07** : رتِّبت ضمن جداول ، قيم إجهادات ضغط العديد من المواد ، مقابل قيم نسب القصافة ، بغية تسهيل الحسابات . بالطبع ينبغي أن لا تزيد الإجهادات الأعظميّة ، عن إجهادات الضغط الأمينة لمادة العنصر ، مهما كانت قيمة نسبة القصافة .

- **2.08** : لا تقتصر نظريّة الدعامات الإنضغاطيّة ، على عناصر تتلقّى قوى ضغط فقط ، فشفاه العناصر المعرّضة لقوى ضغط ولي ، أيضاً عناصر غير مستقرّة ، وإيجاد قيم إجهادات الضغط ، لأمثال تلك العناصر ، خاضعة أيضاً للنظريّة ذاتها . يعتمد عدم ثبات العنصر هنا ، على عدد من العوامل ، لذا تستخدم الجداول ، لتحديد إجهادات الضغط الأمينة .

* **الضغط والإنحناء :**

2.09 - : تعدُّ الأعمدة ، المستخدمة في الأبنية ، كعناصر حاملة ؛ دعامات انضغاطيّة ، معرّضة لإجهادي الضغط والإنثناء ، ناشئين عن تعرُّض الأعمدة أحياناً ، لحمولات لا مركزيّة . لذا كان من المهم أن نتدارس نظريّة ، تجمع تأثيرات الإجهادين معاً .

2.10 - : تبلغ أبعاد مقطع العمود ، الموضّح في الشكل (١١ ـ ١ ـ آ) ؛ (250×450) ملم ، وهو خاضع لحمولة مقدارها (300 KN) ، ومعرّضاً لعزم مقداره (4 KNm) . يعالج العمود هذا بطريقتين :

ـ **الطريقة الأولى :**

2.11 - : لنحسب أولاً ، الإجهاد الناشيء عن حمولة الضغط الصرفة :

$$f_a = \frac{P}{A} = \frac{300 \times 10^3}{450 \times 250} = 2.67 \text{ N/mm}^2$$

ضربت قيمة القوّة (P) بـ (10^3) لتحويل (KN) إلى (N) .

لنحسب بعدئذ إجهادي الشد والضغط ، الناشئين عن العزم :

$$f_c = f_t = \frac{M}{I} y$$

حيث :

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

و :

$$y = \frac{d}{2}$$

إذاً :

$$f_c = f_t = \frac{4 \times 10^6}{250 \times 450^3/12} \times 225 = 0.47 \text{ N/mm}^2$$

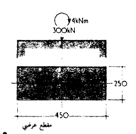
لذا يساوي إجهاد الضغط الأعظمي :

$$2.67 + 0.47 = 3.14 \text{ N/mm}^2$$

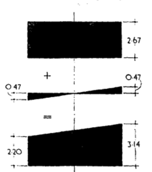
والإجهاد على الحافة المقابلة للمقطع هي :

$$2.67 - 0.47 = 2.2 \text{ N/mm}^2$$

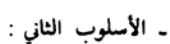
أنظر الشكل (١١ ـ ١ ـ ب) .



الشكل (١١ ـ ١ ـ آ) : المقطع خاضع لحمولة مركّزة وعزم صاف ، النظريّة الأولى ، أنظر الفقرة (2.11) .



الشكل (١١ ـ ١) : المقطع مستطيل الشكل .



ـ الأسلوب الثاني :

2.12 - : تحوّل قوّة وعزم الضغط ، إلى قوّة لا مركزيّة ، فإذا كانت «e» ، هي مسافة لا مركزيّة القوّة ، فإنّها تساوي :

$$e = \frac{M}{P} = \frac{4\times10^3}{300} = 13.3 \text{ mm} .$$

2.13 - : يوضّح الشكل (١٢ ـ ١ ـ آ) ، توزُّع الإجهادات على مقطع عمود مستطيل الشكل . إنّ مساحة المخطّط هذا ، تعادل قوّة الضغط المساوية لـ (300 KN) . كذلك يتطابق مركز ثقل المساحة هذه ، مع نقطة تطبيق القوّة . لهذا يمكننا أن نجد الإجهادات الواقعة على أيٍّ حافة ، من حواف المقطع .

إنّ الأسلوب هذا ، أسلوباً هاماً ، كونه يغطي تصرُّفات المنشأة ، تحت ظروف متغيِّرة .

الشكل (١١ ـ ١ ـ ب) : يظهر الشكل الموضّح في الأعلى الإجهادات الناشئة عن حمولة الضغط ، بينما يظهر الشكل الموضّح في الوسط الإجهادات الناشئة عن العزم الصافي ، أما الشكل الموضّح في الأسفل ، فيظهر قيم الإجهادات الناشئة عن الحمولة والعزم الصافي معاً .

2.14 : إذا زادت الحمولة ، دون تغيُّر في لا مركزيّتها ، أنظر الشكل (١٢ ـ ١ ـ ب) ، فإنّ الإجهادات جميعاً تزداد ، بنفس نسبة زيادة الحمولة ، دون أن يطرأ تغيُّر على توزيع الإجهادات .

13.3 300kN

a

المساحة = 300 KN

تُسْقط نقطة تأثير الحمولة لتكون هي مركز مساحة مخطّط الإجهاد

إن بقيت المسافة المحدّدة للامركزيّة الحمولة ثابتة تزداد قيم الإجهادات ، دون أن يطرأ أيّ تغيّر في طريقة توزيعها وبالتالي يبقى مركز المساحة في مكانه .

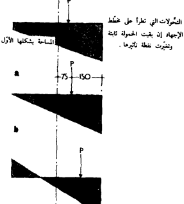
تأثير زيادة شدة القوّة (P) مع بقاء لا مركزيتها ثابتة .

b

الشكل (١٢ ـ ١ ـ آ) : يوضّح الشكل توزيع الإجهادات .

الشكل (١٢ ـ ١ ـ ب) : تؤثّر زيادة شدة القوّة على زيادة الإجهادات إن بقيت لا مركزيّتها ثابتة ، دون أن يطرأ أيّ تغيرٌ على توزيع الإجهادات .

2.15 : إذا كانت لا مركزيّة القوّة المركّزة في ازدياد ، أنظر الشكل (١٣ ـ ١) ، فإنّ الإجهادات على حافة الطرف اليساري من المقطع تتناقص ، أنظر الشكل (١٣ ـ ١ ـ آ) ، بينما تتزايد الإجهادات على حافة الطرف اليميني للمقطع . عندما تصبح الإجهادات على حافة



الشكل (١٣ ـ ١ ـ آ) : يتناقص الإجهاد على الحافة اليسرى ، إلى أن يصبح على ما هو عليه في الشكل (١٣ ـ ١ ـ ب) .

الشكل (١٣ ـ ١ ـ ب) : يتناهي الإجهاد على الحافة اليسرى إلى الصفر ، ويتحوّل مخطّط الإجهاد إلى مخطّط مثلثي الشكل ، إن وقعت نقطة تأثير القوّة ، على الثلث الأوّل الذي يلي منتصف المقطع .

الشكل (١٣ ـ ١ ـ جـ) : تبدأ إجهادات الشد في الظهور ، ابتداء من النقطة التي تلي ثلث منتصف طول المقطع .

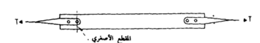
الطرف اليساري مساوية للصفر ، أنظر الشكل (١٣ ـ ١ ـ ب) ، يتحوّل مخطّط الإجهاد ليصبح مثلثي الشكل . إنّ مركز ثقل مخطّط الإجهاد عندها ، سيبتعد عن الطرف اليميني للمقطع ، مسافة تساوي ثلث طول قاعدة المثلث ، وبالتالي سيبتعد عن محور العمود مسافة تساوي سدس طول مقطع العمود . لذا كانت المنطقة الواقعة في منتصف ثلث العمود ، من الأهميّة بمكان ، إذ أنّ الحمولة إن لم تغادر المنطقة هذه ، فإنّه لا توجد إجهادات شد على المقطع ، أما إذا كانت الحمولة ، خارج منتصف ثلث المقطع ، فإنّ جزءاً من المقطع ، يتعرّض لإجهادات شد ، أنظر الشكل (١٣ ـ ١ ـ جـ) . إنّ ما درسناه ليس دوماً خطراً ، ولكن بعض المواد ، قد تتعرّض لإجهادات شد بسيطة جداً ، ومع ذلك تحدث بها تغيُرات جوهريّة ، فتتأثّر بذلك تصرُّفات وسلوكيّة المقطع .

- **2.16** : من الممكن أن تزداد لا مركزيّة الحمولة ، كأن تتركّز خارج المقطع ، وبذا يصبح العزم ، أكثر أهميّة من قوى الضغط ، وعندها ينبغي معاملة العمود ، معاملة الجسر .

* الروابط :

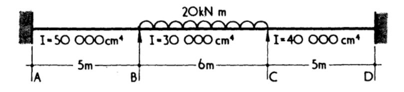
- **2.17** : يسهل إلى حدٍّ ما ، التعامل مع العناصر المعرّضة لقوى شد صرفة . ولكن إذا كان العنصر أيضاً ، معرّضاً لعزوم ، فإنّ معالجته تصبح مشابهة لمعالجة العناصر المعرّضة لعزوم وقوى ضغط معاً . بما أنّه لا توجد حالة عدم استقرار ، فإنّ العناصر المعرّضة للشد ، يمكن اختيارها من العناصر النحيلة ، والنحيلة جداً ، كأن نستخدمها على شكل أسلاك ، أو على شكل شرائح رقيقة .

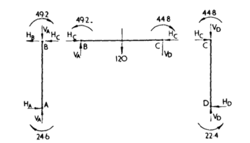
إنّ مساحة العنصر الخاضع لقوى الشد ، عند حساب الإجهاد ، هو مقطع أصغري ، وغالباً ما يكون متطابقاً مع فتحة في العنصر ، أنظر الشكل (١٤ ـ ١) .

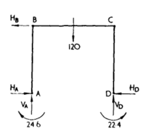


الشكل (١٤ ـ ١) : في عناصر الشد ، كما في الرابط الموضّح في الشكل هذا ، يستخدم في الحساب ، مساحة المقطع الدنيا .

التحليل الإنشائي لمختلف أنواع الجمل الإنشائية المعروفة



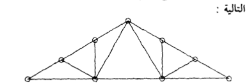




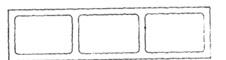
● المقدمة :

- 1.01 : بعد أن تناولنا الإجهادات ، التي تصيب مواد الإنشاء ، وبعد أن تعرّضنا لأساليب التحليل الإنشائي ، لبعض العناصر الحاملة ، كان لابدّ لنا من استقصاء الأساليب والنظم الإنشائيّة .

- 1.02 : تتدرج نظم الإنشاء ، ضمن التصنيفات التالية :



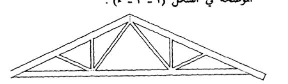
الشكل (١ - ٢ - آ) : يظهر الشكل منشأة هيكليّة سقفها على شكل جائز شبكي ، عناصره موصولة بعضها ببعض ، وفق وصلات مسماريّة .



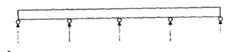
الشكل (١ - ٢ - ب) : يظهر الشكل منشأة هيكليّة ، سقفها على شكل جائز فيرنديل وصلاته صلدة .

١ - المنشآت الهيكليّة ، وفيها تكون الوصلات مسماريّة «ذكر وإنثى» ، وكمثال عليها السطح المؤلّف من جوائز شبكيّة ، أنظر الشكل (١ - ٢ - آ) . ووصلات صلبة ، أنظر إطار فيرنديل ، الشكل (١ - ٢ - ب) .

٢ - منشآت سطحيّة ، وكمثال عليها القشريّة الموضّحة في الشكل (١ - ٢ - ء) .



الشكل (١ - ٢ - جـ) : يظهر الشكل جالونات سطحيّة شائعة الإستخدام ، وهي منشآت هيكليّة ذات وصلات صلدة ، تحلّل غالباً وكأنّها وصلات مسماريّة .



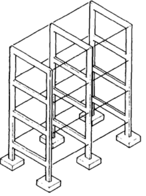
الشكل (١ - ٢ - هـ) : يظهر الشكل جسراً مستمراً ، وهي منشأة تتجمّع فيها خصائص كلّ من المنشآت الهيكليّة وتلك السطحية .

- 1.03 : هناك طرز إنشائيّة أخرىٰ ، يتألّف كلٌّ منها ، من مجموعة من العناصر المتآلفة ، وبذا يشابه نظام الجسر المستمر ، إلىٰ حدٍّ ما ، منشآت الوصلات الصلدة ، كما يشابه أيضاً في جزء منه ، منشآت الوصلات المسماريّة (عند المساند) ، أنظر الشكل (١ - ٢ - هـ) .

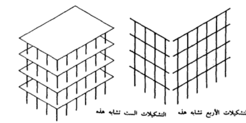
- 1.04 : يعدُّ التحليل الرياضي للمنشآت ، بمثابة تصنيع نموذج للمنشأة . كما تعدُّ الجمل الإنشائيّة المحلّلة ، بمثابة جمل نموذجيّة ، يمكن الإقتداء والأخذ بها .

- 1.05 : للمنشأة المشادة علىٰ الواقع ، ثلاثة أبعاد ، إلّا أنّنا أثناء التصميم ، وبغية تبسيط وتسهيل إجراء الحسابات ؛ نعمل علىٰ تجزيء المنشأة هذه ، إلىٰ عدد من الجمل الإنشائية المستوية ، ذات البعدين . يعدُّ إطار المبنى في الشكل (١ - ٢ - و) ، مثالاً للمعالجة هذه .

- 1.06 : غالباً ما تحلّل المنشآت السطحيّة ، كما لو أنّها منشآت هيكلية . تحلّل المنشأة متعدِّدة الطوابق ، المؤلّفة من بلاطات مستوية ، كالموضّحة في الشكل (١ - ٢ - ز) ، وكأنّها جزأين منفصلين ، تشابكا من خلال وصلات صلدة ، كما في المنشآت الهيكليّة .



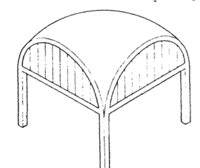
الشكل (١ - ٢ - و) : يظهر الشكل إطاراً حاملاً ، يحلّل باعتباره سلسلة من الأنظمة المستوية .



الشكل (١ - ٢ - ز) : يظهر الشكل نموذج لنظام مؤلّف من بلاطات مستوية ، منضّدة فوق بعضها البعض على شكل أبنية متعدّدة الطوابق . تحلّل أمثال تلك المنشآت وكأنّها منشآت هيكليّة .

- 1.07 : تحلّل غالباً الوصلات الصلدة للمنشآت الهيكليّة ، كما لو أنّها وصلات مسماريّة . ويعدُّ السطح الشائع ، المؤلّف من جوائز شبكيّة ، مثالاً يحتذىٰ في ذلك ، أنظر الشكل (١ ـ ٢ ـ حـ) ، حيث تؤلّف الروافد ، عناصر إنشائيّة مستمرّة ، كبيرة الأبعاد .

- 1.08 : يعتمد الحلُّ الموفّق للمشكلة الإنشائية ، علىٰ الإختيار الدقيق للجملة الإنشائيّة ، إذ أنّ لكل جملة إنشائية ، أسلوب خاص ، تتم من خلاله ، إنجاز عمليّة التحليل الإنشائي .



د

الشكل (١ ـ ٢ ـ هـ) : يظهر الشكل نموذج قشريّة ، وهي واحدة من المنشآت السطحيّة .

●الجمالونات المستوية المقرّرة توازنياً :

2.01- : يمكننا في الجمالونات المستوية المقرّرة توازنيّاً هذه ، تحديد وتعيين كافة القوىٰ ، بصرف النظر ، عن أبعاد أو مادة العنصر . تعدُّ الجوائز الشبكية هذه ، النموذج الأولي ، للجملة الهيكلية ذات الوصلات المسماريّة .

2.02- : إنّ كافّة عناصر الجائز الشبكي هذا ، عناصر تامّة الإستقامة ، وكلّها مرتبطة ببعضها وفق وصلات مسماريّة ، إضافة إلىٰ أنّ كافّة الحمولات وردود الأفعال ، تتركّز عند مواضع تواجد الوصلات ، وبهذا نضمن خلو كافّة العناصر ، من كافّة أنواع العزوم المعروفة . عند حساب الجمالونات ، يهمل الإحتكاك في العقد ، وكذلك وزن القضبان (بالمقارنة مع الأثقال الخارجيّة) ، أو توزّع أوزانها علىٰ العقد . تؤثر علىٰ كلِّ قضيب من قضبان الجمالون قوّتان عند نهايتيه ، وفي حال الإتزان ، يمكن أن تتجه هاتان القوّتان ، علىٰ امتداد القضيب فقط ، لذا كانت قضبان الجمالون إما مشدودة أو مضغوطة فقط .

سنكتفي هنا ، بدراسة الجمالونات المستوية الصلبة (المتماسكة) ، المكوّنة من مثلثات ، والتي لا تحتوي علىٰ قضبان إضافيّة . في هذه الجمالونات ، يرتبط عدد القضبان (K) ، بعدد الوصلات (n) ، بالعلاقة التالية :

$$K = 2n - 3$$

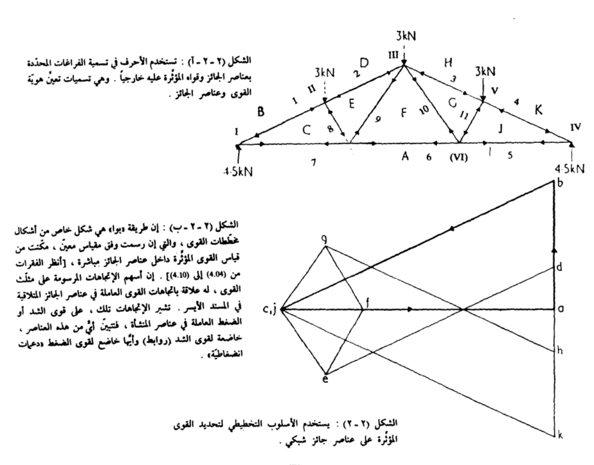
فإذا قلّ عدد القضبان في الهيكل عن ذلك ، يكون الهيكل غير صلب (غير متماسك) ، أما إذا زاد عدد القضبان علىٰ ذلك ، كان الجمالون غير مقرّر توازنيّاً .

يتلخّص حساب الجمالون في تعيين ردود أفعال المساند ، وفي إيجاد الإجهادات في قضبانه . يمكن تعيين ردود الأفعال ، وفق نظريات التوازن المعروفة ، وذلك باعتبار الجمالون ككل ، جسماً صلداً .

- 2.03 : إنّ القوىٰ المؤثّرة علىٰ العناصر ، هي قوىٰ محوريّة صرفة ، وبالإمكان إيجادها ، بتحليل القوىٰ المؤثّر علىٰ كلّ عقدة علىٰ حدىٰ ، وبالتتابع . كما يمكننا استخدام أسلوب المقطع ، كأسلوب بديل . تتلخّص الطريقة هذه ، في تقسيم الجمالون إلىٰ قسمين ؛ بمقطع يمر بثلاثة قضبان يطلب تعيين الإجهادات فيها (أو في إحداها) ، ثم تتم دراسة اتزان أحد هذين القسمين . أمّا القسم الآخر ، فيستبدل تأثيره بالقوىٰ المناظرة ، بتوجيهها علىٰ امتداد القضبان المقطوعة من العقد ، أي باعتبار القضبان مشدودة . ثم يتم بعد ذلك ، تكوين معادلات الإتزان ، مع اختيار مركز العزوم (أو محور المساقط) ، بحيث تحتوي كل معادلة ، علىٰ إجهاد مجهول واحد فقط .

- 2.04 : يصلح الأسلوب التخطيطي لمعظم الحالات ، ويعدُّ من أسهل وأسرع طرق الحساب ، حيث يستخدم مضلّع القوىٰ ، لتسهيل عمليّة تعيين كافّة عناصر القوىٰ المحوريّة المؤثّرة ، علىٰ كافّة عناصر الجائز الشبكي . تسمىٰ الطريقة هذه ، بطريقة «بوا» ، وهي الطريقة التي سنحاول بحثها بالتفصيل ، أنظر الشكل (٢ ـ ٢)

- 2.05 : لإتمام الرسم ، نعيّن أولاً ردود أفعال مساند ارتكاز الجمالون ، علىٰ أن تمثّل القوىٰ المعلومة المؤثّرة علىٰ الجمالون ، وردود أفعال المساند ، بخطوط تمر خارج الجمالون ، ولا تخترق حدوده ، أنظر الشكل (٢ ـ ٢ ـ آ) . نرمز للمناطق المحصورة بين هذه القوىٰ ، وحدود الجمالون ، وكذلك للمناطق المحصورة بين قضبان الجمالون بالرموز (A,B,C..,K,..) ، أنظر أيضاً الشكل (٢ ـ ٢ ـ آ) .



الشكل (٢ ـ ٢ ـ آ) : تستخدم الأحرف في تسمية الفراغات المحدّدة بعناصر الجائز وقواه المؤثّرة عليه خارجياً . وهي تسميات تعيّن هويّة القوى وعناصر الجائز .

الشكل (٢ ـ ٢ ـ ب) : إن طريقة «بو» هي شكل خاص من أشكال مخطّطات القوى ، والتي إن رسمت وفق مقياس معيّن ، مكّنت من قياس القوى المؤثّرة داخل عناصر الجائز مباشرة ، [أنظر الفقرات من (4.04) إلى (4.10)] . إن أسهم الإتجاهات المرسومة على مثلّث القوى ، له علاقة باتجاهات القوى العاملة في عناصر الجائز المتلاقية في المسند الأيسر . تشير الإتجاهات تلك ، على قوى الشد أو الضغط العاملة في عناصر المنشأة ، فتتبيّن أيٌّ من هذه العناصر ، خاضعة لقوى الشد (روابط) وأيّها خاضع لقوى الضغط «دعامات انضغاطيّة» .

الشكل (٢ ـ ٢) : يستخدم الأسلوب التخطيطي لتحديد القوى المؤثّرة على عناصر جائز شبكي .

- 2.06 : نرسم بمقياس الرسم المختار ، مضلّعاً مقفلاً للقوىٰ الخارجيّة المؤثّرة علىٰ مسند الجمالون الأيسر ، وللقوىٰ الداخليّة في القضيبين المتلاقيين في المسند الأيسر هذا ، أنظر الشكل (٢ - ٢ - ب) . تمثّل القوىٰ في المضلّع ، بالترتيب الذي نقابله ، إذا مررنا بحدود الجمالون في اتجاه دوران عقرب الساعة ، أنظر الشكل (٢ - ٢ - ب) ، الخطوط السميكة . يرسم رد الفعل عند المسند الأيسر ، علىٰ شكل خط شاقولي (ab) ، طوله متناسب مع شدّة القوّة المساوية (4.5kn) ، واتجاهها باتجاه الأعلىٰ . نستمر بالدوران حول العقدة اليساريّة ، باتجاه عقارب الساعة ، ونعيّن عناصر القوّة العاملة في القضيب (1) . القوّة العاملة في القضيب (1) ، هي قوّة ضغط ، لذا يرسم الخط الدال عليها نحو الأسفل ، وابتداء من النقطة (b) ، وباتجاه العقدة . يرسم الخط (bc) ، موازياً للقوّة ، ومتجه باتجاه القوّة العاملة في القضيب (1) ، على الرغم من أنّ النقطة (c) ، لم يعرف لها مكاناً بعد . نستمر بالدوران حول العقدة اليساريّة ، باتجاه عقارب الساعة ، فنصدف الرابط رقم (7) ، والمحدّد بالقطاعين (CA) . القوّة العاملة في القضيب هذا ، قوّة شد ، لذا فهي تتجه بعيداً عن العقدة اليساريّة . يرسم منحى الطول (ca) . موازياً لإتجاه الرابط ، ابتداء من النقطة (a) . يتلاقى منحى الإتجاهين (bc) و (ac) في النقطة (c) ، فيتحدّد بذلك الطولين (bc) و (ac) ، الممثّلين لشدتي القوّتين العاملتين في القضيبين (1) و (7) ، على التوالي .

- 2.07 : الوصلة الثانية المراد معرفة القوى المؤثّرة على العناصر المتلاقية بها ، هي الوصلة الوسطيّة ، المعرّضة لقوّة خارجيّة مقدارها (3KN) . نعيد الكرّة ، مبتدئين من القوّة الخارجيّة هذه . يرمز للقوّة هذه ، وفق القطاعين المحصورة ضمنهما وهما (BD) ، لذا نرسم ابتداء من (b) على المخطّط ، خطّاً يوازي اتجاه القوّة ، وطوله يمثّل شدّة القوّة المساوية لـ (3KN) ، فتتحدّد بذلك النقطة (d) ، على المخطّط . بالدوران حول العقدة ، باتجاه عقارب الساعة ، نصدف العنصر (2) ، المحدّد بالقطاعين (DE) .

نرسم من نقطة (d) ، خطاً موازياً لاتجاه القضيب (2) . نستمر بالدوران حول العقدة ، باتجاه عقارب الساعة ، فنصدف العنصر (8) ، المحدّد بالقطاعين (EC) . النقطة (c) ، نقطة محدّدة على المخطّط ، لذا نرسم منها خطاً موازياً لاتجاه القوّة في العنصر (8) . يتلاقى الخطان (de) و (ce) ، في النقطة (e) ، وبذا تتعيّن شدتي القوّتين العاملتين في العنصرين (8,2) ، بقياس المسافة (de) و (ce) على التوالي .

- 2.08 : كما لاحظنا ، وباستخدام أضلاع مضلّع القوى الخارجيّة ، نرسم مضلعّات قوى لكل عقد الجمالون بالترتيب ، بحيث نبدأ بالعقدة التي يتلاقى فيها قضيبان فقط ، وعند ذلك يجب أن نبدأ برسم كل مضلّع بالقوى المعلومة ، ونمثّل كل القوى بالترتيب الذي نقابله ، فيما إذا مررنا بالعقدة قيد البحث ، في اتجاه دوران عقرب الساعة .

نرمز للإجهادات في القضبان ، بنفس الطريقة التي رمزنا بها للقوى الخارجيّة : فنرمز للإجهاد في القضيب (1) مثلاً بالرمز (bc) ، وفي القضيب (7) بالرمز (ca) وهكذا . . . .

بالاستمرار بالدوران باتجاه عقارب الساعة ، نستكمل المرور على كامل العقد ، وبالتالي نستكمل المخطّط الموضّح في الشكل (٢ ـ ٢ ـ ب) .

نلاحظ على المخطّط تطابق النقطتان (c,j) . كما نلاحظ أنّ الخطوط (bd-dh-hk) تقعان على منحى واحد مع الخطوط (ka-ab) ، وإن تعاكسا في الإتجاه ، وهذا ما يعبر عن مناحي واتجاهات القوى الخارجيّة المؤثّرة على الجائز الشبكي موضوع الدراسة .

- 2.09 : لإيجاد إتجاه الإجهادات في القضبان ، وفي القضيب (2) مثلاً من الرسم البياني ، نفصل في مخيّلتنا العقدة (II) ، وبالدوران حولها في اتجاه دوران عقرب الساعة نقرأ رمز القوّة (de) ، وبإيجاد المتجه (de) في الرسم البياني ، نتبينّ بأنّه يتّجه باتجاه العقدة ، فالقضيب مضغوط .

ولإيجاد اتجاه القوّة في القضيب (10) مثلاً ، نفصل العقدة (IV) في مخيّلتنا . وبالدوران حولها في اتجاه دوران عقرب الساعة نقرأ رمز القوّة (fg) ، وبإيجاد المتجه (fg) في الرسم البياني ، نتبينّ بأنّه يتّجه بعيداً عن العقدة ، فالقضيب مشدود ، وهكذا . . . .

2.10 - : قد تصادفنا أثناء رسم المخطّط ، الحالات الخاصّة التالية :

١ - إذا التقت ثلاثة قضبان في عقدة بقوى خارجيّة ، وكان اثنان منها على استقامة واحدة ، فإنّ الإجهاد في القضيب الثالث ، يساوي صفراً .

٢ - إذا وجدت في الجمالون قضبان متقاطعة ، فإنّه يمكن رسم الشكل البياني للإجهادات في هذا الجمالون ، بالطريقة الإعتياديّة ، وذلك باعتبار نقطة تقاطع القضبان عقدة . وعند ذلك فإنّ الإجهادات في أجزاء القضيبين المتساوية في المقدار والإشارة ، ستكون ممثّلة في الرسم البياني مرّتين .

٣ - إذا صادفنا اثناء رسم الشكل البياني ، عقدة يزيد عدد المجاهيل فيها على اثنين ، فإنّها تجب محاولة رسم الشكل البياني لطرفي الجمالون بوقت واحد (إذا كان الجمالون غير متماثل) ، أو تعيين الإجهادات في بعض القضبان تحليلياً ، بطريقة المقاطع . وبطريقة المقاطع هذه ، يمكن التأكّد من صحّة أو دقّة الحل البياني ، في أيّ جزء من الجمالون .

2.11 - : يختلف الشكل الحقيقي للجائز الشبكي ، كثيراً عن ذلك الموضّح في النموذج الحسابي . فنحن نلحظ مثلاً ، أنّ قوى الضغط المؤثّرة في الرافدة (BC) ، المساوية لـ (9KN) ، هي قوّة ناشئة عن حمولة السقف . لا تتركّز القوّة هذه ، عند الوصلة ، بل تتوزّع على عدد من النقاط الواقعة على طول الرافدة . لذا كان من الضروري حساب عزوم الإنحناء ، الناشئة عن الحمولات هذه ، وإيجاد قيمها . يجري التأكّد أخيراً من أنّ مجموع عزوم الإنحناء والإجهادات المحوريّة ، هي أقل من الحدّ الأعظمي المسموح به .

2.12 - : لذا لا تعد الحسابات الجاريّة ، بهدف تحليل النموذج ، الموضّح في هذه الفقرة ، هي آخر المطاف ، بل تعدُّ فقط ، إحدى مراحل الحساب الهامّة ، والتي ينبغي أن تتبعها حسابات تكميليّة أخرى .

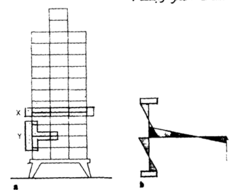
● **الأطر الفراغيّة :**

3.01 - : لقد اكتسبت الأطر الفراغيّة شعبيَّتها ، وانتشرت على نطاق واسع ، بحلول عصر الحاسوب . فلقد كان إلى وقت قريب ، يصعب على الإنشائي ، من خلال وسائله الحسابيّة التقليديّة ، الوصول إلى حل مناسب لمشاكل كافة الأطر الفراغيّة ، ذات الوصلات الصلدة . فقد كان من الصعب تحديد وتعيين القوى المحوريّة ، قوى القص ، والقوى المسبِّبة لعزوم اللي والفتل ، العاملة على عناصر ووصلات العديد من أشكال الأطر الفراغيّة ، بالوسائل المتاحة آنذاك . ولتسهيل العمل ، كان يجري افتراض الوصلات ، وصلات مسماريّة ، وذلك بغية الإستفادة من الإجراءات والحسابات الجارية على الأطر المستوية ، في حلّ مشاكل الأطر الفراغية ، إلاّ أنّ هذه الإجراءات كانت تؤدي إلى رفع التكاليف ، إضافة إلى تعريض مستثمري البناء إلى أخطار كبيرة ، حال تطبيقها لحلِّ مشاكل أطر ، ذات أبعاد ثلاثة .

3.02 - : يقوم بتصميم معظم الأطر الفراغيّة في أيامنا هذه ، مهندسون مختصون بالحساب الإنشائي ، ومن ذوي الخبرة ، القادرون على استخدام برامج الحاسوب المعقّدة .

● **أطر الوصلات الصلدة :**

4.01 - : إنّ تحليل أبنية ضخمة ، متعدِّدة الطوابق ، تربط بين أجزائها وصلات صلدة ، أنظر الشكل (٣ - ٢ - آ) ، هي أيضاً واحدة من أعمال الحاسوب . إلاّ أنّ هناك بعض الإجراءات ، يمكن أن تتخذ بهدف تسهيل وتيسير استخدام طرق الحساب التقليديّة ، منها إجراءات تعمل على تقسيم المنشأة ، إلى منشآت أصغر وأبسط .



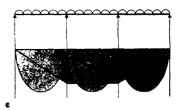
الشكل (٣ - ٢ - آ) : يظهر الشكل نموذجاً لبناء متعدِّد الطوابق ، ذي وصلات صلدة .

الشكل (٣ - ٢ - ب) : إن تلاقي الجسر مع خط الأعمدة ، هو بمثابة المحور الشاقولي (Y) .

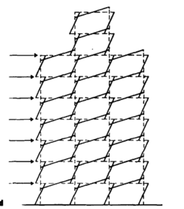
- **4.02** : تحلّل أولاً جسور كل طابق من الطوابق ، باعتبارها جسوراً مستمرّة ، محمولة على أعمدة الطابق ، مشكّلين معاً ، عند نقاط الإتصال ، وصلات مسماريّة . يمكننا تصميم الجسور هذه ، معتمدين على نتائج التحليل ، الموضّح في الشكل (٣ - ٢ - ب) .

- **4.03** : يمكننا بعدئذ ، تقدير عزوم الإنحناء ، المؤثّرة على الأعمدة الخارجيّة ، معتمدين بذلك على قواعد وصيغ تجريبيّة . إننا سنحتاج عند تصميم الأعمدة ، إلى المعلومة هذه ، وإلى الحمولات المحوريّة ، المستخرجة من حمولات بنية البناء ، ومن تلك الحمولات المتراكبة ، فوق بعضها البعض ، والموضّحة في الشكل (٣ - ٢ - جـ) .

- **4.04** : يمكننا أخيراً حساب عزوم الرياح المطبقّة على الأعمدة ، معتمدين على واحدة من العديد من الحسابات التقريبيّة ، وتلك شبه التجريبيّة . إنّ إجراءات التحقّق هذه ، تتيح لنا التأكّد من أنّ الزيادة المحتملة في الإجهادات ، الناشئة عن قوى الرياح ، لم تصل إلى حدٍّ ينذر بالخطر ، أنظر الشكل (٣ - ٢ - ء) .



الشكل (٣ - ٢ - جـ) : يظهر الشكل تحليلاً لجسر نموذجي على المحور (X) .



الشكل (٣ - ٢ - ء) : يظهر الشكل الطريقة التجريبيّة التقريبيّة المستخدمة في تحليل قوى الرياح العاملة على هيكل المنشأة .

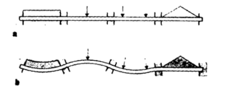
● الجسور المستمرة :

5.01- : إنّ من أكثر المنشآت غير المقرّرة سكونياً ، احتواء للمشاكل والتعقيدات الحسابيّة ، هي الجسور المستمرّة . الجسور المستمرّة نظام هيكلي ، تشترك في تشكيله ، وصلات صلدة وأخرى مسماريّة .

5.02- : هناك طرق عديدة لحلّ مشاكل الجسور المستمرّة ، منها نظريّة العزوم الثلاثة ، نظريّة العمل الوهمي ، خطوط التأثير ، وهكذا .... هناك أيضاً العديد من الجداول المعياريّة ، يمكن من خلالها ، حلّ مشاكل العديد من الجسور المستمرّة ، والتي ترتبط مجازاتها بنسب متنوّعة ، وتخضع إلى ظروف حمليّة متباينة .

5.03- : ينصح لحلّ وتحليل الجسور المستمرة ، استخدام طريقة «هاردي كروس» أو ما يسمى بإسلوب توزيع العزم .

5.04- : تعتمد هذه الطريقة ، على افتراض أنّ كافّة وصلات مساند الفتحات ، المتواجدة على امتداد الجسور المستمرّة ، هي وصلات مقفلة «وثاقات تامّة» ، بحيث يتحوّل كلّ مجاز من مجازات الجسر المستمر ، إلى جسر أفقي مستقل ، موثوق الطرفين ، أنظر الشكل (٤ - ٢ - آ) .



الشكل (٤ - ٢ - آ) : يظهر الشكل القوى المؤثّرة على جسر مستمر موثوق الطرفين .

الشكل (٤ - ٢ - ب) : يظهر الشكل حالة الجسر إن تحرّرت وصلاته .



الشكل (٤ - ٢ - جـ) : يظهر الشكل ما تؤول إليه المنشأة ، عندما تتناهي العزوم الخارجيّة الموازنة إلى الصفر ، أنظر الفقرات من (5.04) إلى (5.07) .

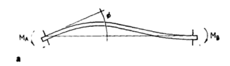
5.05– : تحسب بعدئذ عزوم الوثاقات التامّة ، المتولّدة على أطراف كل مجاز ، والناشئة عن الحمولات الخارجيّة ، بمثابة عزم خارجي ، مطبّق في العقدة .

5.06– : تحرّر بعدئذ إحدى الوصلات المقفلة ، لكي يتاح لها الرجوع إلى حالتها الطبيعيّة ، ومن ثمّ يعاد إقفالها ثانية . في كل مرّة تحرّر فيها الوصلة ، تقوم العزوم السالبة والموجبة فيها ، بإخراج الجسرين الملاصقين للوصلة من طرفيها ، عن توازنهما ، أنظر الشكل (٤ - ٢ - ب) .

5.07– : هناك أيضاً عزوم متبقيّة عن الوصلة المحرّرة ، يعاد توزيعها إلى الطرف المقابل ، من طرفي الوصلتين المقفلتين ، المجاور لها من كل طرف . يجري حساب العزوم المتبقية ، وتؤخذ بعين الإعتبار . وفي نهاية المطاف نقول ، أنّه في كل مرّة ، يتمّ بها تحرير الوصلة ، فإنّ التوازن المسبق للوصلة المجاورة ينهار ، ويعاد فرض عزم آخر إليها . لهذا يتألّف أسلوب توزيع العزوم ، من تكرار لوضعي إقفال وتحرير الوصلات ، إلى أن يتضاءل العزم الباقي عند كل وصلة ، مقترباً من الصفر ، أنظر الشكل (٤ - ٢ - جـ) .

* نظريّة توزيع العزم :

5.08– : لنطبّق عزماً مقداره (M_A) ، على الطرف اليساري من جسر ذي طرفين موثوقين ، وذلك بإدارة الوصلة حول محورها ، بزاوية تساوي (∅) ، أنظر الشكل (٥ - ٢ - آ) . يتولّد عن هذا العزم ، عزماً مقابلاً على الوثاقة (B) ، المتواجدة على الطرف الأيمن من الجسر ، أنظر مخطّط العزم الموضّح في الشكل (٥ - ٢ - ب) .



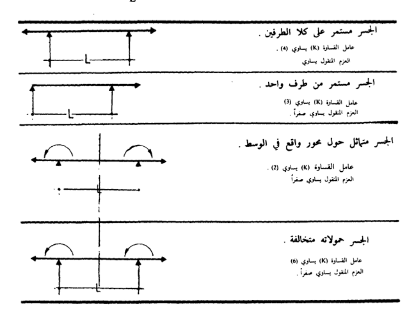
الشكل (٥ - ٢ - آ) : يظهر الشكل جسراً موثوق الطرفين ، معرّضاً لعزم مطبّق على طرف الوثاقة اليسرى .



الشكل (٥ - ٢ - ب) : يظهر الشكل مخطّط العزم .

اللوحة (١ - ٢) : تظهر اللوحة قساوات عناصر الجسر :

$$\text{القساوة} = \frac{KEI}{L}$$.



لقد أشرنا في الفقرة (1.18) ، من الفصل الأوّل ، أنّ مساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) ، يساوي التغيير الحاصل في ميل الجسر ، أي أنّ :

$$\emptyset = \frac{\frac{1}{2}(M_A+M_B)\times L}{EI}$$

5.09– كما أشرنا أيضاً ، وفي الفقرة (1.19) ، من الفصل الأوّل ، أنّ المسافة الشاقولية للنقطة (A) ، الواقعة أسفل المماس المار من النقطة (B) ، يساوي العزم الأوّل لمساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) ، حول (A) . أي :

$$\emptyset = \frac{(M_A + 2M_B) \times L^2}{6EI}$$

إذاً :

$$M_B = -\frac{1}{2} M_A$$

نعوّض في المعادلة الأولىٰ ، فنجد أنّ :

$$\emptyset = M_A \times \frac{L}{4EI}$$

أو :

$$M_A = \frac{4EI}{L} \times \emptyset$$

- 5.01 يدعىٰ المقدار ($\frac{4EI}{L}$) ، صلابة الجسر . والصلابة تعريفاً ، هي العزم المطلوب لإنجاز دوران وحدة الطول . يزوّدنا الجدول (١ ـ ٢) ، بقيم الصلابة العائدة لبعض الجسور ، وهي خاضعة لظروف تحميل خاصّة .

5.11– : لقد أثبتنا أنّ :

$$M_A = -\frac{1}{2}M_B$$

هذا يعني أنّ العزم المستحث يساوي بقيمته نصف العزم المطبّق . تشير الإشارة السالبة هذه ، إلىٰ أنّ عزم التقوّس المطبّق ، يسبّب عزم ارتخاء مستحث ، أنظر الشكل (٧ ـ ٢) . لا يوجد اصطلاح متعارف عليه لتحديد الإشارة ، وسنرىٰ فيما بعد ، أنّ العزم المستحث والمنقول ، يمكن أن يشابه بإشارته العزم المطبّق .

* حساب الجسر المستمر :

5.12- : إنّ تشكيلة الجسر المستمر ، نراها موضّحة في الشكل (٦ ـ ٢)

5.13- : يمكننا حساب نسب الصلابة ، لكل زوج من المجازات ، على النحو التالي :

$$\text{الصلابة} = \frac{KEI}{L}$$

حمولة محورّية مركَزة

30kN

حمولة موزّعة بانتظام (25 KN·m)

A I=600x10⁶ B I=600x10⁶ C I=500x10⁶ D I=500x10⁶ E

7000 — 5000 — 6000 — 6000

جسور من مادة واحدة ، لذا فإن عامل المرونة (E) ثابت على كامل المقطع

الشكل (٦ ـ ٢ ـ آ) : يظهر الشكل الحمولة المطبّقة على الجسر ، موضوع المثال الموضّح في الفقرات من (5.12) إلى (5.28) .

إنّ الكمية (E) في المثال هذا ، هي كميّة ثابتة ، على كامل المجازات . لذا يمكننا إهمالها ، لكونها قيمة تختزل عند استخراج النسب .

5.14- : يمكننا حساب قساوة مجازات الجسر ، من خلال تتبُّع الحسابات النهائيّة ، المتواجدة على القسم الأيمن من الجدول (٢ ـ ٢) ، بحيث تكون :

اللوحة (٢ ـ ٢) : تظهر اللوحة نسب قساوة عناصر الجسر المستمر الموضّح في الشكل (٦ ـ ٢) .

رمز المجاز	k	I	L	قساوة كل منها $10^6 \times E \times$		B	C	D
AB	3	600×10^6	7000	256		0·35		
					736			
BC	4	600×10^6	5000	480		0·65	0·59	
					813			
CD	4	500×10^6	6000	333			0·41	0·57
					583			
DE	3	500×10^6	6000	250				0·43

صلابة المجاز (AB)=256

صلابة المجاز (BC)=480

لذلك تكون نسبة صلابة (AB)=

$$\frac{256}{256+480}=0,35$$

وتكون نسبة صلابة (BC)=

$$\frac{480}{256+480}=0.65$$

لاحظ أن مجموع نسبتي الصلابة ، على طرفي العقدة يساوي (١) .

5.15– : بعدئذ نحسب عزوم الطرف الموثوق لكل مجاز ، بعد الإفتراض أنّ الوثاقة وثاقة تامّة عند المساند . نفترض أنّ المسندين الطرفيين ، هما مسندين مسماريين ، عند حساب العزوم موثوقة الطرف ، وأيضاً كما في الأعلى ، عند حساب صلابة المجاز .

يحسب العزم عند (B) ، للمجاز (AB) من العلاقة التالية :

$$M_F = \frac{WL^2}{8} = \frac{25 \times (7)^2}{8} = 153 \text{ KN.m.}$$

يحسب العزم عند (B) ، للمجاز (BC) ، حيث الحمولة موزّعة بانتظام ، من العلاقة التالية :

$$M_F = \frac{W\ell^2}{12} = \frac{25\times(5)^2}{12} = 52 \text{ KN.m.}$$

وللحمولة المركّزة :

$$M_F = \frac{PL}{8} = \frac{30\times5}{8} = 19 \text{ KN.m.}$$

فيكون مجموع العزم عند (B) ، للمجاز (BC) هو :

52+19=71 KN.m.

يساوي العزم عند (C) ، للمجاز (BC) ، قيمة العزم عند (B) ، للمجاز (B) للتناظر أي = (71 KN.m)

يحسب العزم عند (C) و (D) ، للمجاز (CD) ، حيث الحمولة موزّعة بانتظام ، من العلاقة :

$$M_F = \frac{W\ell^2}{12} = \frac{25\times(6)^2}{12} = 75 \text{ KN.m.}$$

يحسب العزم عند (D) ، للمجاز (DE) ، حيث الحمولة موزّعة بانتظام ، من العلاقة :

$$M_F = \frac{W\ell^2}{8} = \frac{25\times(6)^2}{8} = 112 \text{ KN.m.}$$

* إصطلاح الإشارة :

5.16– : عند وضع قيمة عزوم المساند ، ضمن لوحة توزيع العزوم ، ينبغي وضع الإشارة الصحيحة لكل عزم متواجد على طرف موثوق . ويتم ذلك بتأمُّل العزم الفاعل على نهاية المجاز . إذا كان العزم يحرِّك المجاز باتجاه عقارب الساعة ، فهي عزوم موجبة ، وإذا كانت العزوم مخالفة لإتجاه عقارب الساعة ، كانت العزوم سالبة ، أنظر الشكل (٦ ـ ٢ ـ ب) .

5.17– : الآن ، وبعد وضع الإشارات الصحيحة ، لنتأمّل التوزيع الأوّل ، في مثالنا ، والمجرى عند الوصلة (B) . إنّ فرق العزم عند طرفي الوصلة (B) يساوي :

$+153-71=+82$ KNm.



الشكل (٦ ـ ٢ ـ ب) : اصطلاح الإشارة المتّبع أثناء توزيع العزوم .

اللوحة (٣ ـ ٢) : جدول توزيع العزوم .

A	B		C		D	E
	0·35	0·65	0·59	0·41	0·57	0·43
	+153	− 71	+71	−75	+ 75	−112
	− 29	− 53	+ 2	+ 2	+ 21	+ 16
		+ 1	− 26	+ 10	+ 1	
		− 1	+ 9	+ 7	− 1	
		+ 4			+ 3	
	− 1	− 3			− 2	− 1
	+ 123	−123	+ 56	− 56	+ 97	− 97

إنّ العزم الموجب هذا ، سيؤدي إلى تحطيم توازن العقدة ، مالم يوازن بعزم مطبّق ، يعاكسه في الإشارة ، ويساويه في القيمة ، يتوزّعه القضيبين المتلاقيين في (B) ، كلًا حسب نسب قساوته أي :

سيكون نصيب القضيب (BA) من العزم هو :

$0.35\times(-82)=-29$

سيتركّز هذا العزم على الوصلة (B) ، للإتجاه (BA) .

وسيكون نصيب القضيب (BC) من العزم هو :

$0.65\times(-82)=-53$

5.18– : بعد توزيع العزم الفائض هذا ، على كلا طرفي الوصلة ، نضع خطاً تحتها . عندما تتوازن كافة

الوصلات ، نطبّق العزوم المنقولة ، كما هو واضح من خلال الأسهم في الجدول (٣ ـ ٢) . إنّ العزم المنقول إلى الوصلة المجاورة ، يساوي نصف العزم الموازن المطبّق .

5.19– : عندما يصل العزم الموازن المطبّق ، المراد تجبيز نصفه إلى الوصلة المجاورة ، إلى قيمة منخفضة جداً ، في كافة وصلات الجسر المستمر ، نرسم خطاً طويلاً ، ونجمع قيم العزوم في كل عمود . ينبغي أن تتساوى قيم العزوم عند طرفي كل وصلة ، كما ينبغي عليهما أن يتخالفا في الإشارة .

نلخّص الخطوات فنذكر :

١ ـ نحسب عزم الوثاقة التامة ، الناجم عن الحمولات الخارجيّة لكل عنصر من عناصر الهيكل .

٢ ـ نحرّر كل عقدة على حدى ، مع بقاء بقيّة العقد موثوقة . ولدى تحرير العقدة ، نوزّع العزم الفائض فيها ، على العناصر الملتقية فيها ، بموجب عوامل النقل .

٣ ـ نكرّر العمل عدّة مرات ، عقدة فعقدة ، إلى أن يصبح العزم الفائض صغيراً مهملاً .

٤ ـ نجمع ما حصلنا عليه جمعاً جبرياً ، فنحصل على العزوم في نهايات العناصر .

* عزوم انعطاف المجاز الحر :

5.20– : قبل رسم مخطّط عزم الإنعطاف ، لابدّ لنا من حساب عزوم انعطاف المجاز الحر :

عند (AB):

$$\mathcal{M}_s = \frac{W\ell^2}{8} = 153 \text{ KNn.}$$

في (BC) والناتجة عن الحمولة الموزّعة :

$$\mathcal{M}_s = \frac{W\ell^2}{8} = \frac{25 \times (5)^2}{8} = 78 \text{ KNn.}$$

وفي (BC)

والناتجة عن الحمولة المركّزة :

$$\mathcal{M}_s = \frac{PL}{4} = \frac{30\times5}{4} = 38 \text{ KNm.}$$

وبذا يكون مجموع العزم في (BC):

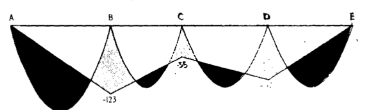
$$78+38=116 \text{ KNm.}$$

في القطعتين (CD) , (DE):

$$\mathcal{M}_s = \frac{W\ell^2}{8} = 112 \text{ KNm.}$$

* مخطّط عزم الإنعطاف :

5.21- : لرسم مخطّط عزم الإنعطاف ، أنظر الشكل (٧ ـ ٢) ، نتّبع إصطلاح إشارة عزم الإنعطاف الإعتيادية ، والتي تفترض أنّ عزوم الإرتخاء ، هي عزوم موجبة ، والعزوم الداعية إلى التقوّس عزوماً سالبة ، أنظر الشكل (٨ ـ ٢) . وفي الواقع نرى أنّ معظم عزوم أواسط المجازات ، هي عزوم موجبة ، وأنّ عزوم المساند هي عزوم سالبة .



الشكل (٧ ـ ٢) : يظهر الشكل مخطّط عزم الجسر الموضّح في الشكل (٦ ـ ٢) .

إصطلاح العزم السالب

تقوّس

إصطلاح العزم الموجب

ارتخاء

الشكل (٨ ـ ٢) : يوضّح الشكل إصطلاح الإشارة المتعارف عليه في رسومات مخططات عزوم الإنعطاف . حيث يرسم العزم السالب فوق الخط الدال على منحى الجسر ، والعزم الموجب يرسم أسفل الخط الدال على منحى الجسر .

* حساب قوى القص وردود الأفعال :

5.22- : لنحسب قوى القص وردود الأفعال ، متأمِّلين المجاز (AB) ، وآخذين العزوم حول (B) ، أنظر الشكل (٩ - ٢) .

$$R_A \times L = W \times L \times \frac{1}{2} L - \mathcal{M}_B$$

$$R_A = \frac{1}{2} WL - \frac{\mathcal{M}_B}{L}$$

$$= 25 \times 7 \times 0.5 - \frac{123}{7}$$

$$= 88 - 18 = 70 \text{ KN.}$$

إذاً :

5.23- : بشكل مشابه نأخذ العزوم حول (A):

$$S_{BA} = \frac{1}{2} W\ell + \frac{\mathcal{M}_B}{\ell}$$

$$= 25 \times 7 \times 0.5 + \frac{123}{7}$$

$$= 88 + 18 = 106 \text{ KN.}$$

وللمجاز (BC) ، نأخذ العزوم حول (C) :

$$S_{BC} = \frac{1}{2} WL + \frac{1}{2} P + \frac{\mathcal{M}_B - \mathcal{M}_C}{L}$$

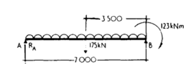
$$= 25 \times 5 \times 0.5 + 30 \times 0.5 + \frac{123 - 56}{5}$$

$$= 62 \quad + \quad 15 \quad + \quad 13$$

$$= 90 \text{ KN.}$$

$$R_B = S_{BA} + S_{BC} = 106 + 90 = 196 \text{ KN.}$$

بتلك الطريقة ، يمكننا إيجاد كافة قوى القص وردود الأفعال ، المؤثِّرة على الجسر .

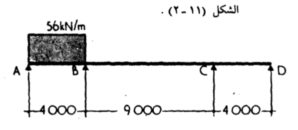


الشكل (٩ - ٢) : يظهر الشكل طريقة حساب قوى القص وردود الأفعال المؤثِّرة على المجاز (AB) .

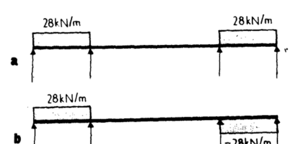
* الأسلوب المستخدم لترتيب الجسور تُرتيباً متناظراً :

5.24 - في معظم الحالات ، تكون المنشأة متماثلة ، إلاّ أنّ الحمولات المطبّقة عليها ، ليست كذلك . يعدُّ الشكل (١٠ ـ ٢) ، مثالاً نموذجيّاً للحالة هذه .

5.25 - أيّ جملة من الحمولات ، يمكن تحويلها إلى مجموعتين ، إحداها متماثلة ، والأخرى متخالفة . يدعى الترتيب هذا ، انشطار الحمولات ، ونراه موضّحاً في الشكل (١١ ـ ٢) .



الشكل (١٠ ـ ٢) : يظهر الشكل جسراً متناظراً بحمولات متخالفة .



الشكل (١١ ـ ٢ ـ آ) : يظهر الشكل جسراً متناظراً وحمولاته متماثلة .

الشكل (١١ ـ ٢ ـ ب) : يظهر الشكل جسراً متناظراً متخالف الحمولة .

الشكل (١١ ـ ٢) : طريقة إعادة ترتيب حمولات الجسور المستمرّة .

- 5.26 : لنحسب عزم الطرف الموثوق

عند (B) ، وفي المجاز (AB) نجد أنّ :

$$M_f = \frac{W\ell^2}{8} = \frac{28(4)^2}{8} = 56 \text{ KNm}$$

اللوحة (٤ - ٢) : تظهر اللوحة قساوة المجازات في حالة الجسر المتخالف .

رمز المجاز	k	E	I	L	القساوة		النسب
AB & CD	3	—	—	4	0·75	0·97	0·77
BC	2	—	—	9	0·22		0·23

A	B		C
	0·77	0·23	
	+56		
	−43	−13	
	+13	−13	

- 5.27 : عزم الطرف الموثوق ، كما هو في السابق يساوي (56 KNm .

اللوحة (٥ - ٢) : تظهر اللوحة قساوة المجازات في حالة الجسر المتخالف .

رمز المجاز	k	E	I	L	القساوة		النسب
AB & CD	3	—	—	4	0·75	1·42	0·53
BC	6	—	—	9	0·67		0·47

A	B		C
	0·53	0·47	
	+56		
	−30	−26	
	+26	−26	

- 5.28 : نعود إلى اصطلاح الإشارة الإعتيادية ، ونوحّد حالات الحمولة ، لإعطاء الشكل النهائي للتحميل :

$M_B = (-13) + (-26) = -39$ KNm

$M_c = (-13) + (+26) = +13$ KNm

● الأطر الحاملة :

- 6.01 : يمكن أن تعدّ الجسور المستمرّة ، واحدة من المنشآت ذات البعد الواحد ، على الرغم من أنّ الحمولات وردود الأفعال عليها ، تقع في البعد الثاني .

تزداد تعقيدات المنشأة ، فور تحوّلها إلى منشأة ذات بعدين ، كما في الإطارات الحاملة . هناك أساليب متنوِّعة لمعالجة الأطر الهيكليّة ذات البعدين ، وذات الأبعاد الثلاثة منها :

١ - توزيع العزم (كما رأينا في الفقرة السابقة) .

٢ - حل الأطر بطريقة القوى الواحديّة أو مُعامِلْ التأثير .

٣ - طريقة التشوُّهات أو طريقة الميل والسهم .

٤ - جداول كلينلوغيلز .

٥ - برامج الحاسوب الجاهزة .

إنّ الأسلوبين الأخيرين ، ليسا من أساليب التحليل الدقيقة ، بل إنّها حصيلة أساليب أخرى ، ويمكن لنا استخدامها ، لحلٍ عدد من المشاكل المحدودة .

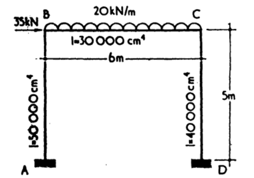
- 6.02 : يمكننا الإستفادة من جداول الحساب الجاهزة ، التي تحفل بها كتب تخصّصت بحساب الجسور المستمرّة ، البوابات المتغيِّرة ، والأطر متعدِّدة الفتحات ، إلّا أنّ ذلك سيكون مدعاة لعمل كثير ، لذا أخذ المهندسون مؤخّراً ، يتوجّهون نحو استخدام برامج الحاسوب الجاهزة . يمكن أن نجد الحسابات والأجهزة هذه ، في مكاتب متخصِّصة ، يلجأ إليها المهندسون عند الحاجة . إلا أنّ أغلب مهندسي الإنشاء ، يربطون مكاتبهم مباشرة ، بالمكاتب التخصصيّة هذه ، بغية توفير الوقت والجهد معاً ، حيث يتلقون مباشرة ، ما يريدونه من معلومات ، ومن خلال أجهزتهم الخاصة . إن لم يتوفّر واحد من الأسلوبين هذين ، فلا بأس من استخدام واحد من الأساليب الثلاثة الأولى .

- 6.03 : يعتمد أسلوب توزيع العزم على التكرار ، وفي بعض الحالات ، قد تتكرّر العمليّة ، ليصبح تكرارها مملاً ، وفي حالات أخرى ، يسقط الأسلوب ويعجز عن الوصول إلى الحل المتوازن . نحتاج لإنجاز التحليل ، توزيعاً منفصلاً ، لكل نموذج من الحمولات المطبّقة تقريباً ، لا تربط بينها معادلات وحسابات آنية . في حال الحاجة إلى حسابات دقيقة ، يستعصي علينا أحياناً الفراغات المتروكة ، والمخصّصة لاستيعاب أكثر من رقم يلي الفاصلة .

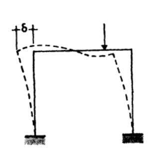
- 6.04 : يعد أسلوب مُعامِلْ التأثير ، أسلوباً أكثر قوّة ، ويمكن استخدامها بشكل فعّال ، لحلِّ مشاكل أيِّ منشأة هيكليّة من ذوات البعدين ، أو الأبعاد الثلاثة . هذا ، وما إن اكتشفت المصفوفات المرنة ومعكوساتها ، حتى أصبح من السهل على المصمِّمين ، إيجاد حساب العديد من حالات الحمولات ، دون تعقيدات تذكر . على أيِّ حال ، ليس من الممكن دوماً ، عكس المصفوفة يدوياً ، إذ تعتمد الكثير من النتائج عادة ، على فروقات بسيطة ، تختلف بها كميّات ضخمة ، مما يدعو إلى استخدام أعداد كثيرة بعد الفاصلة ، توخياً للوصول إلى درجة الدقّة المطلوبة ، قد يضيق بها حيِّز الجداول اليدويّة .

- 6.05 : نظريّة الميول والتشوُّه ، هي نظريّة صالحة لحلِّ مشاكل المنشآت البسيطة ، إلاّ أنّها تقود غالباً إلى معادلات متواقتة «آنية» ، كما هو الحال في أسلوب القوى الواحدية ، المعتمد على مبدأ العمل الوهمي .

- 6.06 : لعرض طريقة تحليل منشأة إطاريّة غير مقرّرة سكونيّاً ، وإعطاء فكرة عن ما يعترض أساليب الحل ، من مشاكل وتعقيدات ؛ رأينا طرح مثال لإطار حامل ، طرفاه السفليان ، مثبّتان على شكل وثاقة ، أنظر الشكل (١٢ ـ ٢) . سيجري حلّ الإطار بطريقتين ، الأولى وتعتمد أسلوب توزيع العزم ، والثانية وتعتمد طريقة القوى الواحدية . تعمّدنا أن يكون المثال هذا ، لإطار ليس بمتماثل . هذا ، وسواء أكان الإطار ، إطاراً غير متماثل ، أو كانت الحمولة المطبّقة على الإطار ، حمولة غير متناظرة ، فلا بد للإطار من أن يتمايل ويترنّح ، أنظر الشكل (١٣ ـ ٢) . مع العلم أن اتجاهات الترنّح والتمايل ، ليست دوماً واضحة . هذا ، ولابّد من تأمّل ترنّح الإطار ، ومعرفة اتجاهاته ، خصوصاً إن كان يراد تطبيق أسلوب توزيع العزوم .



الشكل (١٢ ـ ٢) : يظهر الشكل مثالاً لإطار حامل ، جرى تحليله وفق طريقتي توزيع العزم وعوامل التأثير .

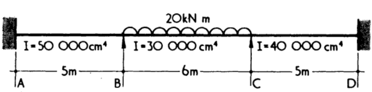


الشكل (١٣ ـ ٢) : يظهر الشكل اتجاه وشكل ترنّح إطار حامل متخالف الحمولة .

* أسلوب توزيع العزم :

- **6.07** : يحوّل الإطار أولاً ، إلى جسر مستمر ، أنظر الشكل (١٤ ـ ٢) . تعيّن بعدئذ صلابة كلّ ذراع من أذرعة الإطار ، أنظر الفقرة (5.14) ، وتعيّن عزوم التثبيت على طرفي الذراع (BC) ، أنظر الفقرة (5.16) .

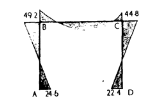
- **6.08** : تستخدم نتائج الحسابات ، المسجّلة على اللوحة (٦ ـ ٢) ، في رسم مخطّط العزوم ، أنظر الشكل (١٥ ـ ٢) . نفترض أنّ النقطتين (B) و(C) ، **نقطتان** ثابتتان في مكانهما ، ولكي تثبتان ، لابدّ من **قوّة أفقيّة** تساوي (H_B) . نقسّم بعدئذ الإطار ، وفق عناصره المكوّنة ، أنظر الشكل (١٦ ـ ٢) .



الشكل (١٤ ـ ٢) : يحوّل الإطار إلى جسر مستمر .

اللوحة (٦ ـ ٢) : جدول توزيع العزوم .

A	B		C		D
	0·67	0·33	0·38	0·62	
		−60	+60		
+20	+40	+20	−22·8	−37·2	−18·6
		−11·4	+10		
+ 3·8	+ 7·6	+ 3·8	− 3·8	− 6·2	− 3·1
		− 1·9	+ 1·9		
+ 0·6	+ 1·3	+ 0·6	− 0·7	− 1·2	− 0·6
		− 0·4	+ 0·3		
+ 0·2	+ 0·3	+ 0·1	− 0·1	− 0·2	− 0·1
+24·6	+49·2	−49·2	+44·8	−44·8	−22·4



الشكل (١٥ ـ ٢) : يظهر الشكل مخطّط عزم الإطار الحامل .

لحساب القوى المؤثّرة على القطعة (BC) ، نأخذ العزوم حول (C) :

$$V_A \times 6 = 120 \times 3 + 49.2 - 44.8$$

إذاً :

$$V_A = 60.73 \text{ KN.}$$

و :

$$V_D = 120 - 60.73 = 59.27 \text{ KN.}$$

ولحساب القوى المؤثّرة على القطعة (CD) ، نأخذ العزوم حول (D) :

$$H_c \times 5 = 44.8 + 22.4$$

$$H_c = 13.45 \text{ KN} = H_D.$$

ولحساب القوى المؤثّرة على القطعة (AB) ، نأخذ العزوم حول (A) :

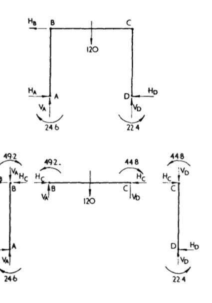
$$(H_B + H_C) \times 5 = 49.2 + 24.6$$

إذاً :

$$H_B = 1.31 \text{ KN.}$$

و :

$$H_A = 14.76 \text{ KN.}$$

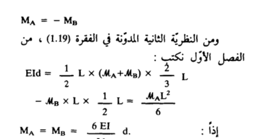


الشكل (١٦ ـ ٢) : يقسّم مخطّط عزم الإنعطاف إلى عناصره المكوّنة .

- 6.09 : لكي تحافظ النقطة (B) ، على موضعها الأصلي ، لابدّ من تطبيق قوّة أفقيّة مقدارها (1.31 KN) ، تتجه بها نحو اليسار . وبما أن النقطة هذه ، معرّضة لقوّة مركزة مقدارها (35 KN) ، تتجه بها نحو اليمين ، فإنّ حصيلة القوّتين ، هي قوّة أفقيّة ، شدتها تساوي (33.69 KN) ، وتتجه نحو اليمين . إذا أزيلت كافّة الحمولات الأخرى ، المؤثّرة على الإطار ، وتحرّرت النقطتان (B) و(C) ، فإنّ الإطار سيترنّح باتجاه اليمين ، مخلّفاً مسافة تساوي (d) ، تبعد بها النقطة (B) ، عن موضعها الأصلي .

إنّ صلابة الوصلتين (A) و(B) ، تحول دون دوران النقطتين هاتين ، وإن كانا قد تحرّرا من قيديها الذي يشدُّهما إلى موضعها الطبيعي على الإطار .

- 6.10 : إنّ طرفي العنصر (AB) ، طرفان مثبّتان ، على شكل وثاقتين تامتين ، أنظر الشكل (١٧ ـ ٢) . تنحرف النقطة (B) ، مسافة شاقوليّة تساوي (d) . تنص النظريّة الأولى ، المدوّنة في الفقرة (1.18) من الفصل الأوّل ، على أنّ مساحة المخطّط ($\frac{M}{EI}$) يساوي الصفر ، لذا فإنّ :



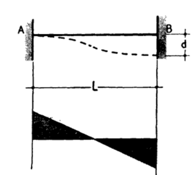
$$M_A = -M_B$$

ومن النظريّة الثانية المدوّنة في الفقرة (1.19) ، من الفصل الأوّل نكتب :

$$EId = \frac{1}{2} L \times (M_A + M_B) \times \frac{2}{3} L - M_B \times L \times \frac{1}{2} L = \frac{M_A L^2}{6}$$

إذاً :

$$M_A = M_B = \frac{6\,EI}{L^2}\, d.$$



الشكل (١٧ ـ ٢) : يوضّح الشكل مخطّط عزم انعطاف عنصر موثوق الطرفين .

6.11 - : تستخدم النتائج هذه ، في توزيع العزوم ثانية ، لإيجاد عزوم الأطراف الثابتة . إنّ المسافة (d) ، ما زالت غير معلومة ، لذا يمكننا في هذه المرحلة ، إعطاء أيٍّ قيمة للمقدار (6 EId) ، ولنفرض أنّ هذا المقدار يساوي الواحد . يوضِّح الشكل (١٨ - ٢) ، المخطّط الجديد للعزوم والقوى المؤثِّرة على الإطار .

6.12 - : كما في السابق ، نوجد القوى الخارجيّة المؤثِّرة على الإطار من خلال قوانين التوازن :

$V_D = -V_A = 1.84 \times 10^{-6}$ KN.

$H_D = 2.7 \times 10^{-6}$ KN.

$H_A = 3.1 \times 10^{-6}$ KN.

$H_B = 5.8 \times 10^{-6}$ KN.

6.13 - : يبرهن ذاك ، أنّ القوّة الأفقيّة المساوية لـ (5.8×10^{-6} KN) ، المطبّقة عند النقطة (B) ، تسبِّب هبوطاً أو ترنُّحاً مسافته تساوي ($\frac{1}{6E}$ m) ، كما تسبِّب عزوماً ، توزّع كما هو موضّح في الشكل (١٨ - ٢) .

6.14 - : إن ضربت العزوم هذه بالقيمة ($\frac{33.69}{5.8 \times 10^{-6}}$) ، لكان الناتج ، هو العزم المتحصِّل عن تطبيق القوّة الأفقيّة ، والمصحِّحة للهبوط الناشىء عن عدم تناظر الإطار . يتيح الجدول (٩ - ٢) ، إجراء مقارنة ما بين الوسائل المتنوِّعة المتاحة ، للحصول على القيم المجهولة .

الشكل (١٨ - ٢) : يظهر الشكل مخطّط توزيع العزوم الثانويّة .

* أسلوب مُعامِلْ التأثير أو طريقة القوى الواحدية :

- 6.15 : ينتج الأسلوب هذا ، سلسلة من المعادلات الآنيّة ، الصالحة لحل أيّ إطار . يحلُّ البسيط من هذه المعادلات بالطرق اليدوية ، بينما يحل معظمها بواسطة الحاسوب .

يعتمد الأسلوب هذا ، على نظريّة سنثبتها كما هي ، دون برهان .

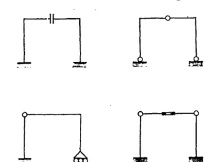
- 6.16 : إنّ المعادلة الناظمة للأسلوب هذا هي :

$$X = - G^{-1} \times U$$

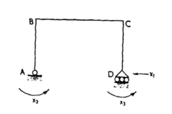
إنّ الأحرف (U, G, X) ، هي ليست دلالة على أعداد مفردة ، بل تشير إلى منظومة من الأعداد تدعى المصفوفات . سنعرض في الفصل الثالث ، فكرة موجزة لنظريّة المصفوفات .

- 6.17 : (X) هي مصفوفة عمود أو مصفوفة الكميّات الموجّهة ، الممثّلة لنوعية التثبيت ، (G) هي المصفوفة المرنة للمنشأة ، و(U) هي الحل الخاص للحمولة المطبّقة المعطاة .

- 6.18 : إن الإطار الحامل الموضّح في الشكل (١٢ ـ ٢) ، هو إطار غير مقرّر توازنيّاً ، ومن الدرجة الثالثة ، لكونه يحوي على ثلاثة قيود زائدة . العمل الأوّل الواجب إجراؤه ، هو جعل الإطار مقرّر توازنيّاً ، بإزالة قيوده الثلاثة . إنّ الأساليب المتبعة لإنجاز ذلك ، نراها موضّحة في الشكل (١٩ ـ ٢) . سنستخدم لمثالنا هذا ، الطريقة الموضّحة في الشكل (٢٠ ـ ٢) . تدعى المنشأة الناتجة عن تطبيق الأساليب هذه ، المنشأة المحرّرة .

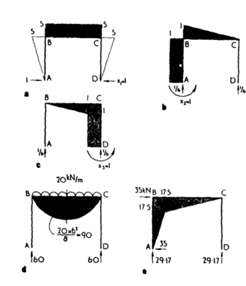


الشكل (١٩ ـ ٢) : يظهر الشكل أشكالاً مختلفة من المنشآت المحرّرة ، الإصطلاحات التخطيطيّة للتشكيلات هذه ، نراها موضّحة في اللوحة (٧ ـ ٢) .



الشكل (٢٠ ـ ٢) : تشكيلة المنشأة المحرّرة ، ونوعيّة عناصر التثبيت المختارة ، المستخدمة في مثالنا هذا .

6.19 ـ : نلاحظ في الشكل (٢٠ ـ ٢) ، كيف حلّت المفصلة محلّ الوثاقة في النقطة (A) ، والمسند المتدحرج بدل الوثاقة في النقطة (D) . استعيض عن الوثاقات ، بعزوم مطبّقة على النقطتين (A) و(D) ، وبردّ فعل أفقي عند النقطة (D) . يشار إلى المجاهيل الثلاثة بالأحرف (x_3, x_2, x_1) على التوالي ، أنظر الشكل (٢٠ ـ ٢) . الإطار الآن هو إطار مقرّر توازنيّاً ، *لذا* فإننا سنعمل على رسم مخطّط العزم الخاص به ، من أجل ($x_1 = 1$) ، ($x_2 = 1$) ، و($x_3 = 1$) ، ومن خلال معرفتنا للحمولات المطبّقة على الإطار ، أنظر الشكل (٢١ ـ ٢) . ترسم المخططات دوماً ، للجهة الممثّلة لجهة شد العنصر .



الشكل (٢١ ـ ٢) : يظهر الشكل مخططات عزوم الإنعطاف .

الشكل (٢١ ـ ٢ ـ آ) : لطريقة التثبيت الأولى : ($x_1=1$) .

الشكل (٢١ ـ ٢ ـ ب) : لطريقة التثبيت الثانية : ($x_2=1$) .

الشكل (٢١ ـ ٢ ـ جـ) : طريقة التثبيت الثالثة : ($x_3=1$) .

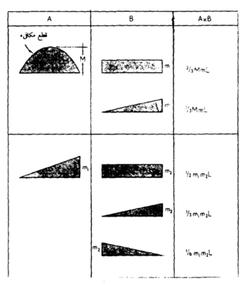
الشكل (٢١ ـ ٢ ـ د) : يظهر الشكل تأثيرات الحمولة الموزعة بانتظام .

الشكل (٢١ ـ ٢ ـ هـ) : يظهر الشكل العزوم المتولّدة عن القوة الأفقيّة .

- 6.20 : يجمّع بعدئذ كل زوج من المخططات معاً ، بغية الحصول على عوامل التأثير ، لتأخذ مكانها في حقل مصفوفة المرونة . لإنجاز التجميع ، نتأمّل العنصر (AB) ، كما هو موضّح في الشكلين (٢١ ـ ٢ ـ آ) و(٢١ ـ ٢ ـ ب) . إذ تحسب مقادير الصلابة الممتدة أفقياً ، أنظر الشكل (٢١ ـ ٢ ـ آ) ، وتلك الممتدة شاقولياً ، أنظر الشكل (٢١ ـ ٢ ـ ب) ، وتقسّم النتيجة على المقدار (EI) الخاص بالعنصر ، فتكون النتيجة هي تجميع لما ينتاب العنصر (AB) ، تحت تأثير القيدين معاً ، أنظر الشكل (٢٢ ـ ٢) . إذا كانت العزوم واقعة مع العنصر في اتجاه واحد ، كانت العزوم المجمّعة معاً عزوماً موجبة ، وعلى الجوانب المقابلة سالبة .

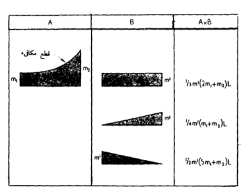
الشكل (٢٢ ـ ٢) : يظهر الشكل مخطّط تداخل مخططي العزم المؤثّرين على العنصر (AB) .

يعطينا الجدول (٨ ـ ٢) ، قائمة بالقيم التي غالباً ما نصدفها عملياً ، أثناء ممارسة الحل ، وهي قيم تساعدنا كثيراً في تبسيط الحسابات .



اللوحة (٨ ـ ٢) : يعطينا الجدول قيماً جديدة ، هي قيم تجميع مخططات عزمين معاً .

إن الأشكال التي تمّ تناولها هنا ، هي من أكثر المخططات ، التي يمكن مصادفتها أثناء تحليل المنشآت أو الأطر الحاملة .



- **6.21** : لنتأمل الوثاقتين (١) و(٢) ، أنظر الشكلين (٢١ ـ ٢ ـ آ) و(٢١ ـ ٢ ـ ب) :

$$g_{12} = \frac{\frac{1}{2} \times 5 \times 1 \times 5}{E \times 5} + \frac{\frac{1}{2} \times 5 \times 1 \times 6}{E \times 3}$$

$$= + 7.5$$

إذا كانت قيمة (E) ، ثابتة في الحدين ، يمكننا إغفالها عند إجراء الحساب .

للحصول على قطر المصفوفة الأساسي ، نجمع كل مخطّط إلى نفسه . يكفينا لإنجاز الحساب ، حساب القيم على جانب قطري واحد ، كما هو واضح : $g_{31} = g_{13}$.

- 6.22 : إنّ مصفوفة المرونة الناتجة عن التجميعات كافة هي :

$$G = \begin{matrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{matrix} = \begin{matrix} 68.75 & 7.5 & -8.125 \\ 7.5 & 1.67 & -0.33 \\ -8.125 & -0.33 & 1.92 \end{matrix}$$

- 6.23 : إنّ المصفوفة الآن جاهزة للقلب . إنّ مصفوفة كهذه ، يمكن حلّها يدوياً ، إلا أنّ الحاسوب المكتبي ، يجعل حلّها أيسر .

إن المصفوفة العكسيّة هي :

$$G^{-1} = \begin{matrix} 0.089 & -0.336 & 0.318 \\ -0.336 & 1.889 & -1.095 \\ 0.318 & -1.095 & 1.677 \end{matrix}$$

- 6.24 : عند هذه المرحلة ، وليس قبلها ، ينبغي مراعاة الحمولة المطبّقة على الإطار . يتم الحساب لاستخراج معطيات عمود المصفوفة المراد تسجيل الحل الخاص عليه ، بتجميع مخططات العزم الخاصّة بمنشأة محرّرة تنتج عزومها عن حمولات مطبّقة ؛ إلى مخططات منشأة موثوقة الأطراف ، والمستخدمة في إيجاد مصفوفة المرونة .

- 6.25 : على سبيل المثال ، يجمّع المخطّط (٢١ ـ ٢ ـ آ) ، إلى مجموع المخططين (٢١ ـ ٢ ـ د) و(٢١ ـ ٢ ـ هـ) :

$$U1 = \frac{\frac{1}{3}\times5\times175\times5}{5} \text{ (العنصر AB)}$$

$$- \frac{\frac{2}{3}\times5\times90\times6}{3} - \frac{\frac{1}{2}\times5\times175\times6}{3} \text{ (العنصر BC)}$$

$$+ 0 \text{ (العنصر CD)} = -1767.$$

6.26- : ما إن يحسب عمود الحل الخاص ، حتى تصبح المعادلة جاهزة لكتابتها على الشكل التالي :

$$\begin{matrix} X_1 = & 0.089 & -0.336 & 0.318 & \times & 1767 \\ X_2 & -0.336 & 1.889 & -1.095 & & 264 \\ X_3 & 0.318 & -1.095 & 1.677 & & -118 \end{matrix}$$

تقلب إشارات عمود الحل الخاص ، لكي تتطابق مع الإشارة السالبة للمعادلة الناظمة ، المتواجدة في الفقرة (6.16) . توجد أمامنا الآن مصفوفة بسيطة ، تساعد في حساب قيم الوثاقات . فعلى سبيل المثال :

$$X_3=0.318\times1767-1.095\times264-1.677\times118=75$$

وبشكل مشابه نجد أنّ : $X_1=31$ $X_2=34$

6.27- : يمكن استخدام القيم هذه ، لإيجاد قيم العزوم عند أي نقطة ، مستعينين بالشكل (٢١ ـ ٢) . على سبيل المثال ، لإيجاد «$\mathcal{M}_B$» نكتب :

$\mathcal{M}_B=31\times5$ (الوثاقة «١») $+34\times1$ (الوثاقة «٢») $+75\times0$ (الوثاقة «٣») $+0$ (الأفقيّة) -175 (الموزّعة) $=14$ KNm.

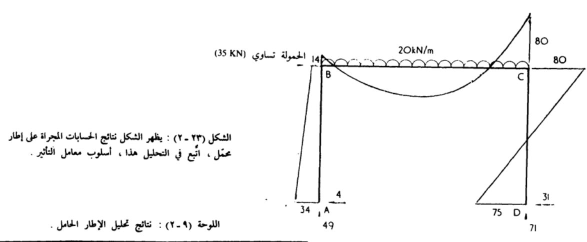
6.28- : بشكل مشابه نحسب رد الفعل الشاقولي عند (D) :

$V_D=31\times0$ (الوثاقة «١») $-34\times\frac{1}{6}$ (الوثاقة «٢») $-75\times\frac{1}{6}$ (الوثاقة «٣») $+60$ (الحمولة الأفقيّة) $+29.17$ (الحمولة الموزّعة) $=71$ KN

6.29- : إنّ المقادير الناتجة عن الحسابات المجراة وفق الأسلوب هذا ، نراها موضّحة في الجدول (٩ ـ ٢) ، حيث نستطيع مقارنة النتائج هذه ، مع القيم التي أمكن الحصول عليها ، بتطبيق أسلوب توزيع العزم . يعطينا العمود الأخير ، النتائج التي يمكن الحصول عليها ،باستخدام برامج الحاسوب

اللوحة (٧ ـ ٢) : الدلالات التخطيطيّة للعناصر المحرّرة .

المنقولات	الإسم	الدلالة التخطيطيّة لطريقة التثبيت .
لاشيء	قطع	
عزم قوّة محوريّة	مسند متدحرج	
قوّة قص محوريّة	مفصلة	
عزم قص	عمد	



الشكل (٢٣ - ٢) : يظهر الشكل نتائج الحسابات المجراة على إطار محمّل ، اتّبع في التحليل هذا ، أسلوب معامل التأثير .

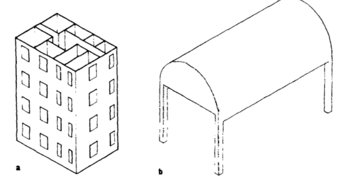
اللوحة (٩ - ٢) : نتائج تحليل الإطار الحامل .

	النتائج المستخلصة من تطبيق أسلوب توزيع العزم .			النتائج المستخلصة من تطبيق أسلوب مُعامِل التأثير .	النتائج المستخلصة من استخدام الحاسوب في عمليّة التحليل .
	الحمولات الشاقولية	الترنّح	المجموع		
M_A	−24·6	+57·0	+32·4	+34	+37·1
M_B	+49·2	−33·2	+16·0	+14	+13·4
M_C	+44·8	+30·9	+75·7	+80	+68·2
M_D	−22·4	−47·7	−70·1	−75	−73·1
V_A	+60·73	−10·7	+50·0	+49	+49·2
V_D	+59·27	+10·7	+70·0	+71	+70·8
H_A	+14·76	−18·0	− 3·2	− 4	− 4·7
H_D	+13·45	+15·7	+29·3	+31	+30·3

● المنشآت السطحيّة

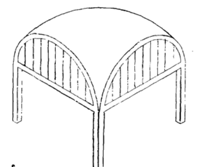
* المنشآت الخلويّة :

7.01 - : تندرج المنشآت السطحيّة ، ضمن تصنيفين أساسيين ، الأوّل ويدعى المنشآت الخلويّة ، وفيه تتألّف المنشآت من بلاطات مستوية ، ترتّب على هيئة صندوق ، والثانية منشآت سطوحها منحنية ، كالقشريات ، القبب ، وما إلى ذلك ، أنظر الشكل (٢٤ - ٢) .



الشكل (٢٤ - ٢ - ب) : منشأة قشريّة على شكل اسطوانة .

الشكل (٢٤ - ٢ - آ) : منشأة خلويّة .

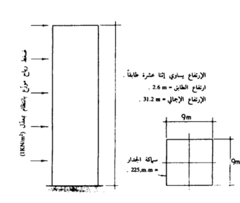


الشكل (٢٤ - ٢ - جـ) : منشأة قشريّة ذات منحنيين .

الشكل (٢٤ - ٢) : يظهر الشكل مجموعة من المنشآت السطحيّة .

7.02- : يعد جدار البلوك الحامل ، واحداً من أشكال المنشآت الخلوية ، والذي سنتناوله بمزيد من التفصيل في الجزء الثامن «المنشآت الحجريّة» .

يتضمّن التحليل عموماً ، حساب الحمولة الواقعة على بانوه شاقولي ، والناشئة عن ما تتلقاه من حمولات ميّتة وحيّة ، إضافة إلى تقدير حمولات الرياح ، مستعينين لحساب ذلك ، بأساليب الحساب التقريبي . يمكننا تقدير الحمولات الميّتة والحيّة ، المحمولة على بانوه ، من خلال تأمُّل مسقط البناء . يمكننا حساب حمولة الرياح ، بالنظر إلى البناء وكأنّه جسر ظفري ، امتدّ شاقولياً .



يمكننا باستخدام أساليب تمّ شرحها سابقاً ، إيجاد المحور المحايد وثوابت المقطع . يمكننا بعد ذلك ، استخدام القيم هذه ، لإيجاد الإجهادات الأعظمية ، التي تنتاب البانوهات ، والناشئة عن الرياح .

7.03- : لنتأمل المثال الموضّح في الشكل ، ولنحسب حمولة الرياح :

$$A=4\times9=0.225=8.1\ m^2.$$

$$I=\frac{2}{3}\times(9)^3\times0.225=109\ m^4.$$

$$Z=\frac{109}{4.5}=24.1\ m^3.$$

ـ الحمولات :

الحمولات والأوزان الميّتة على كافة الأرضيات وعلى السطح تساوي : $2.5\ KN/m^2$.

الحمولة الحيّة على كافة الأرضيّات وعلى السطح تساوي : $2.5KN/m^2$. وزن الجدار = $4.5KN/m^2$

عزم الوثاقة الناشىء عن حمولة الرياح =

$$\frac{W\ell}{2} = 1\times9\times(31.2)^2\times0.5 = 4380\ KN/m$$

إذاً إجهاد الرياح =

$$\pm\frac{M}{Z} = \pm\frac{4380}{24.1} = \pm182\ N/m^2.$$

أو = $\pm0.18\ N/mm^2$.

الوزن الميت الكلي للبناء =

$$12 = 2.5\times(9)^2(\text{الأرضيات}) + 4\times4.5\times9\times31.2(\text{الجدران}) \times$$

$= 7484\ KN.$

الحمولات الحيّة الكليّة =

$$12 = 2\times(9)^2 = 1944\ KN. \times$$

إجهاد الحمولة الميّتة =

$$\frac{7484}{8.1} = 920\ KN/m^2 = 0.92\ N/mm^2.$$

إجهاد الحمولة الحيّة :

$$\frac{1944}{8.1} = 240\ KN/m^2 = 0.24\ N/mm^2.$$

إجهاد الضغط الأعظمي = إجهاد الحمولة الميّتة + إجهاد الرياح + إجهاد الحمولة الحيّة .

إجهاد الضغط الأعظمي $= 0.92+0.24+0.18 = 1.34\ N/m.m^2$

إجهاد الضغط الأصغري = إجهاد الحمولة الحيّة - إجهاد الرياح

إجهاد الضغط الأصغري $= 0.92-0.18 = 0.74\ N/m.m^2$

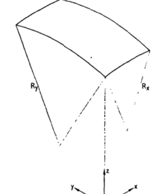
7.04ـ : إنّ الإجهادات الناشئة عن حمولات ميّتة ، في النقاط ذاتها ، ينبغي لها أن تضاف إلى حمولات الرياح . في جدران البلوك الحاملة ، لا نجيز تأثيرات قوى الشد ، وبالتالي ينبغي أن تتجاوز إجهادات الحمولة الميّتة ، إجهادات الشد الناشئة عن الرياح ، بهامش أمان معقول .

7.05ـ : في منشآت البانوهات المشادة من البيتون مسبق الإجهاد ، يمكننا حشر قضبان ربط شاقوليّة ، في الوصلات مابين البانوهات ، لامتصاص قوى شد الرياح . أما في جدران البلوك والبيتون ، فإنّ إجهادات الضغط ، التي هي حصيلة جمع إجهادات ضغط الرياح الأعظميّة ، إلى إجهادات الحمولات الحيّة والميّتة ؛ ينبغي أن تكون قيمتها ، ضمن حدود قدرة المادّة على التحمُّل .

* منشآت السطح المنحني :

7.06– : هناك كتب عديدة ، تتناول طرق حساب منشآت السطوح المنحنيّة ، إلا أننّا سنقدّم هنا ، خطوطاً عريضة ، تمكّننا من تحليل وفهم ما ينتاب تلك السطوح ، عند تلقيها لقوى مفروضة . قبل النظر في مقاومة السطوح المنحنية ، ينبغي إدراك الخصائص الهندسيّة ، التي تتميّز بها سطوحها .

7.07– : يمكن النظر إلى أيّ سطح ، باعتباره سلسلة من الخطوط . تدعى كافة الخطوط اللامستقيمة ، خطوطاً منحنية . تتنّوع درجة انحناء الخطوط اللامستقيمة ، عند كل نقطة من نقاط الخط ، أنظر الشكل (٢٥ ـ ٢) . تتصف الخطوط الدائريّة ، بنصف قطر انحناء ثابت . ترتبط درجة انحناء نقاط الأشكال



الشكل (٢٦ ـ ٢) : يوضّح الشكل درجة انحناء سطح .

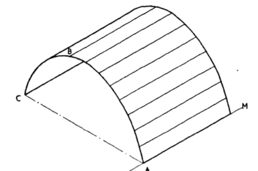
الدائريّة ، بأنصاف أقطارها بالعلاقة التالية :

$$\text{درجة الإنحناء} = \frac{1}{R}$$

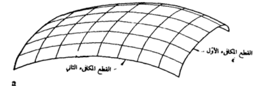
7.08– : تتحدّد مقاطع عنصر السطح المنحني البسيط ، أنظر الشكل (٢٦ ـ ٢) ، بمحورين متجهين (x) و (y) ، وتتحدّد درجة انحناء كلٍّ من خطوطها ، بالعلاقتين $\frac{1}{R_x}$ و $\frac{1}{R_y}$. إنّ درجتي الإنحناء هاتين ، تحدّد السطح عند أيّ نقطة .

الشكل (٢٥ ـ ٢) : يوضّح الشكل عدداً من أنصاف اقطار انحناءات خط منحني عادي .

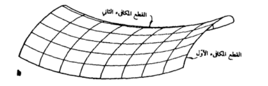
7.09- : إنّ الخط (ABC) ، الموضّح في الشكل (٢٧ - ٢) ، هو خط يشكّل نصف دائرة ، نصف قطرها (R) . يشمر تجوُّل النقطة (A) ، الواقعة على الخط هذا ، على طول المولِّد الممثّل بالمستقيم (Lm) ، عن نصف اسطوانة . يمكننا توليد العديد من السطوح ، بتحريك أحد الخطوط على طول آخر . إن بقيت هذه الخطوط موازية لنفسها ، دعيت السطوح المكوّنة هذه ، السطوح الإنتقالية ، أنظر الشكل (٢٨ - ٢) .



الشكل (٢٧ - ٢) : يظهر الشكل كيفيّة توليد سطح بتحريك خط ما (ABC) ، على طول خط آخر (LM) .



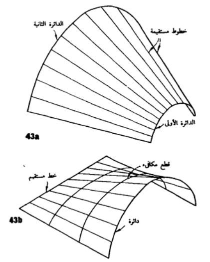
الشكل (٢٨ - ٢ - آ) : يظهر الشكل قطعاً مكافئاً اهليليجيّاً .



الشكل (٢٨ - ٢ - ب) : يظهر الشكل قطعاً مكافئاً زائديّاً .

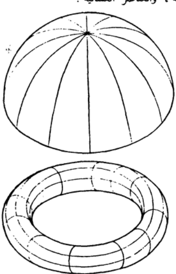
الشكل (٢٨ - ٢) : يظهر الشكل سطوحاً انتقاليّة .

-7.10 : على أيِّ حال ، لا يتحرّك الخط دوماً ، بشكل موازٍ لنفسه ، إذ يمكن أن يتبع طرفاه ، منحنيين مختلفين ، مما يولِّد سطوحاً مخروطيّة الشكل ، أنظر الشكل (٢٩ ـ ٢) . إن ثُبِّت أحد الطرفين ، وترك الآخر يتحرّك على محيط دائرة ، لكانت النتيجة ، سطحاً دورانياً ذي محور وحيد ، أنظر الشكل (٣٠ ـ ٢) .



الشكل (٢٩ ـ ٢) : يظهر الشكل سطوحاً مخروطيّة .

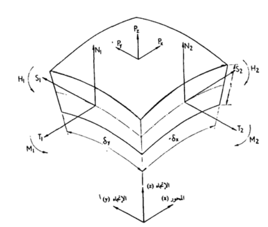
-7.11 : إنّ معرفتنا بالخصائص الهندسيّة هذه ، تساعدنا على تفهم طرق التحليل الإنشائي ، المتّبعة في التحليل الإنشائي ، لثلاثة أنواع رئيسيّة ، من أنواع القشريات ، وهي : القشريات السمكية ، القشريات الرقيقة ، والعناصر الغشائيّة .



الشكل (٣٠ ـ ٢) : يظهر الشكل سطوحاً دورانيّة .

* القشريات السمكية :

7.12- : يوضّح الشكل (٣١ - ٢) ، عنصراً بسيطاً على شكل قشريّة ثخينة ، كما يوضّح القوى الرئيسيّة المؤثّرة عليها من كل وجه . تدعى القوى الموضّحة هذه ،



الشكل (٣١-٢) : يظهر الشكل عنصراً من قشريّة ثخينة .

محصّلات الإجهاد ، وهي عبارة عن قوى تخضع لها كل وحدة طول من قوس السطح . للحصول على الإجهادات هذه ، نقسّم القشريّة إلى اقسام ، سماكة كلٍّ منها (t) .

7.13- : يتعرّض كل وجه مقتطع من وجوه القشرية ، إلى خمسة أشكال من محصّلات الإجهاد :

«T» : وهي حصيلة الإجهاد المباشر ، العامل عند المحور المحايد للمقطع .

«S» : وهي المركّبة المماسيّة .

«N» : وهي المركّبة العاموديّة ، لمحصّلة إجهادات القص . إلّا أنّ الإجهاد المباشر ، ليس ثابتاً على كامل مقطع القشريّة ، لذا توجد أيضاً :

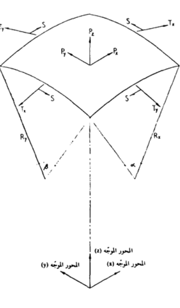
«$\mathcal{M}$» : وهي عزم محصّلة إجهاد الإجهادات المباشرة ، الواقعة على المقطع .

«H» : وهي محصّلة إجهاد مختلف إجهادات القص العابرة للمقطع ، وهي بمثابة عزوم فتل . تنتج الإجهادات هذه ، عن القوى المطبّقة «P_z, P_y, P_x» . يشار إلى إحداثيات العنصر في الإتجاهات (z, y, x) بـ (w, v, u) على الترتيب . يتطلّب تحليل محصّلات الإجهاد هذه ، تقنيّات متقدّمة .

* العناصر الغشائيّة :

7.14- : الغشاء عبارة عن قشرية نحيلة جداً ، بحيث لا تملك أيّ قدرة على مقاومة ما يدعوها إلى الإنثناء . لذا ينبغي أن تكون محصّلة الإجهادات ، المرموز لها بـ (H, $\mathcal{M}$, N) تساوي صفراً ، تاركينها خاضعة فقط ، لمحصّلتي الإجهاد ، المرموز لهما بـ (T,S) ، أنظر الشكل (٣٢ - ٢) . كما ينبغي أن تقتصر إجهادات المحصّلة (T) على إجهادات الشد ، لكون إجهادات الضغط ، تسبّب تحدّب المنشأة الغشائيّة هذه ، لعدم تحلّيها بالصلابة الكافية لمقاومة ذلك .

7.15- : لنتأمّل العنصر الإنشائي الموضّح في الشكل (٣٢ - ٢) ، حيث تساوي درجتي الإنحناء في الإتجاهين (y,x) ؛ ($\frac{1}{R_x}$) و ($\frac{1}{R_y}$) على التوالي . كما تقابل حواف العنصر الغشائي هذا ، زاويتي (α) و (β) ، عند محور درجة الإنحناء . إنّ الضغط المطبّق على العنصر لكل وحدة مساحة عموديّة على السطح تساوي (P) . لنحلّل في الإتجاه هذا :



الشكل (٣٢ ـ ٢) : يظهر الشكل عنصر غشائي .

$\times$

$$P_x \alpha R_x \times \beta R_y = 2T_x \times \beta R_y \times \sin\alpha/2 + 2T_y \times \alpha R_x \times \sin\beta/2$$

وبما أنّ الزاويتين (β, α) صغيرتين جداً ، فإنّ :

$$\sin\alpha/2 \approx \alpha/2$$

لهذا يمكن كتابة :

$$P.R_x.R_y = T_X.R_y + T_y.R_x$$

$$P = \frac{T_x}{R_x} + \frac{T_y}{R_y}$$

7.16 : كمثال على ذلك ، لنتأمّل بالوناً كروياً ، سماكة مادته (0.5 mm) ، وقطره ستون متراً . فإذا كان الضغط الداخلي يعادل ($1400\ N/m^2$) ، فما هي الإجهادات الواقعة في المادة ؟

بما أنّ البالون كروي الشكل فإنّ :

$$T_x + T_y$$

و : $R_x = R_y$

لهذا : $P = \frac{2T}{R}$

و : $T = \frac{1}{2} R.P$

$$= \frac{1}{2} \times 30 \times 1400$$

$$= 21000\ N/m.$$

الإجهاد الآن يساوي :

$$\frac{T}{\text{السماكة}} = \frac{21000}{0.5\times10^{3}} = 42\ N/mm^{2}.$$

7.17– : إنّ محصّلات قوّة القص ، لا تدخل في حساباتنا هذه ، وذلك لعدم وجود مركّبة عموديّة على سطح كروى . ولكن في أنواع أخرى من السطوح ، تلعب قوى القص هذه ، دوراً كبيراً في تعزيز مقاومة المنشأة الغشائيّة هذه ، للحمولات العموديّة العاملة على إحباط توازنها . تعامل الخيم ، البالونات ، والمنشآت المملوءة غازات مضغوطة ، معاملة المنشآت الغشائيّة ، إن أريد تحليلها تحليلاً إنشائيّاً .

* القشريّات النحيلة :

- 7.18 : لا يجوز أن تتعرّض القشريّة النحيلة ، إلى عزوم انعطاف ، أو إلى إجهادات عموديّة ، كما لا يجوز ذلك للقشريّات الرقيقة ، التي تتحدّب فور تعرُّضها لإجهادات ضغط بسيطة . على ذلك ، لا يبق من محصّلات الإجهادات ، سوى المحصّلتين «T» و«S» ، حيث يمكن أن تكون «T» ، إجهادات ضغط ، كما يمكن أن تكون إجهادات شد . يوجد أيضاً ما يدعى ، بمحصّلة الإجهادات الغشائيّة . إنّ معظم المنشآت المنحنية المعروفة ، هي قشريات نحيلة ، وليست بقشريّات سميكة أو غشائيّة .

- 7.19 : يحتاج تحليل المنشأة القشرية النحيلة النموذجيّة ، كالأسقف البيتونيّة ، اسطوانية الشكل ؛ شيئاً من الدراية . تبدأ الإجهادات اللا غشائيّة بالسيطرة ، بالقرب من أطراف القشريّة . يمكن معالجة القشريّة الطويلة ، التي يزيد طولها عن أربعة أضعاف درجة انحناء السقف ، معاملة الجسور العاديّة ، مع المحافظة على البنية الهندسيّة ، للجملة الإنشائية . في حالة القشريّة العاديّة ، مع المحافظة على البنية الهندسيّة ، للجملة الإنشائيّة . في حالة القشريّة الإسطوانيّة المتميِّزة بالصفة هذه ، نجد أنّ الجمالونات القشريّة ، هي جمالونات صلبة ، بما فيه الكفاية ، لجعل الإجهادات اللا غشائيّة ، هي المسيطرة على العناصر هذه .

نجد من الضروري في القشريّات الطويلة ، أن نحول دون أن تمتد الحواف المستقيمة للسطوح ، بشكل عرضي ، مفضية للفعل القوسي . يمكن لنا إنجاز ذلك ، باستخدام الجسور الطرفية .

7.20 - : يعطينا التحليل الموضّح في الشكل (٣٣ - ٢) ، فكرة موجزة وتقريبيّة عن الإجهادات المطبّقة ، بينما يترك التصميم الدقيق ، للمهندس المختص .

الحمولة لكل متر امتداد =

$$\frac{\pi \times 6}{2} \times 2.5 = 23.6 \text{ KN.}$$

إذاً العزم في وسط المجاز يساوي :

$$\frac{23.6 \times (15)^2}{8} = 664 \text{ KNm.}$$

$$A = \pi r t = 3.142 \text{ xrt}$$

$$I = tr^3 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) = 0.298 \text{ tr}^3 .$$

$$Z_1 = 0.83 \text{ tr}^2$$

$$Z_2 = 0.47 \text{ tr}^2$$

إذاً :

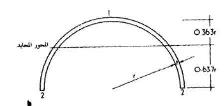
$$f_c = \frac{664}{0.83 \times 0.075 \times (3)^2} = 1185 \text{ KN/m}^2 =$$

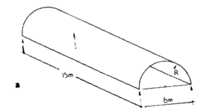
1.19 N/m.m^2

وكذلك :

$$f_t = \frac{664}{0.47 \times 0.075 \times (3)^2} = 2093 \text{ KN/m}^2 =$$

2.09 N/m.m^2 .





الشكل (٣٣ - ٢) : يظهر الشكل نموذجين لمنشأتين قشريتين .

* **الصفيحة المتعرّجة :**

7.21 - : تعدُّ الصفيحة المتعرّجة ، أحد أمثلة القشريّات الرقيقة . تصمّم أمثال تلك الصفائح ، وكأنّها جسر ممتد في الإتّجاه الطولي . فضلاً على ذلك ، يمكننا تقدير الإجهادات العرضيّة ، بالنظر إلى المنشأة ، وكأنّها سلسلة من الجسور المستمرّة ، تعمل فيها الطيّات ، عمل مساند الإرتكاز . وبما أنّنا نستطيع تطبيق تلك الطريقة ، على الصفائح الطرفية ، كان لابدّ من إيصال الحواف الحرّة ، إلى صلابة كافية ، بطريقة ما .

7.22 - : يوضّح الشكل (٣٤ ـ ٢ ـ آ) ، مثالاً لصفيحة قشريّة ذات طيّات . تبلغ الحمولة على المسقط ، ما مقداره ($6\ KN/m^2$) .

عزم الإنثناء الطولي :

$$\mathcal{M} = \frac{W\ell^2}{8} = \frac{6\times8\times(20)^2}{8} = 2400\ \text{K.N.m}\ .$$

المقطع المكافىء ، أنظر الشكل (٣٤ ـ ٢ ـ ب) :

$$Z = \frac{bd^2}{6} = \frac{0.46\times(3.46)^2}{6} = 0.92\ m^3$$

إذاً :

$$f_{bt} = f_{bc} = \frac{2400}{0.92} = 2.60\ N/m.m^2\ .$$

حساب عزم الإنعطاف في الإتجاه العرضي ، أنظر الشكل (٣٤ ـ ٢ ـ جـ) .

العزم السالب الأعظمي عند (B وD) :

$$= 3 \times (4)^2 \times 0.107 = 5.15\ KNm\ .$$

العزم الموجب الأعظمي في المجازات (AB وDE) :

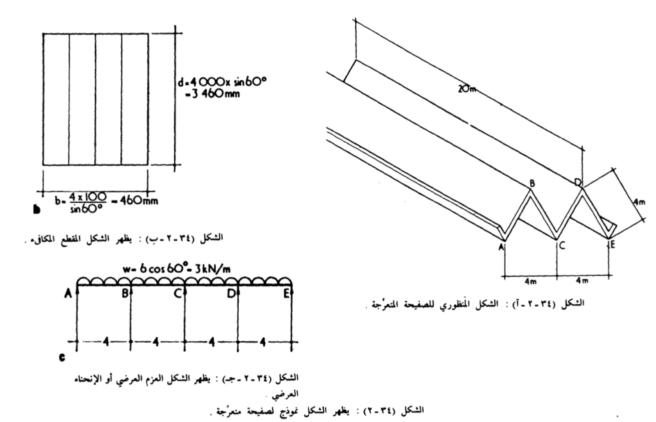
$$= 3 \times (4)^2 \times 0.077 = 3.07\ KNm\ .$$

ويكون قيمة المعامل «Z» ، لكل (١) م من العرض :

$$= \frac{1 \times (0.1)^2}{6} = 0.00167\ m^3$$

إذاً :

$$f_{bc} = f_{bt} = \frac{5.51 \times 10^{-3}}{0.00167} = 3.08\ N/m.m^2\ .$$



الشكل (٣٤-٢-ب) : يظهر الشكل المقطع المكافىء .

الشكل (٣٤-٢-آ) : الشكل المنظوري للصفيحة المتعرِّجة .

الشكل (٣٤-٢-جـ) : يظهر الشكل العزم العرضي أو الإنحناء العرضي .

الشكل (٣٤-٢) : يظهر الشكل نموذج لصفيحة متعرِّجة .

• القشريّات ذات الفتحات الشماليّة :

7.23 - : إنّ القشريّة ذات الفتحات الشماليّة ، هي المثال الثالث ، للقشرية الرقيقة ، وبها يتقطّع تأثير القوى والإجهادات في الإتجاه العرضي ، يوضح الشكل (٣٥ - ٢) سلسلة من القشريّات هذه ، المثبّتة بدعامات انضغاطيّة عند الفواصل ، مع جمالونات لتأكيد الحفاظ على معالم القشريّة الجانبيّة . عند تحليل أمثال الجمل الإنشائيّة هذه ، يمكن النظر إلى كلّ مجاز من مجازات القشريّة ، وكأنّه جسر من الجسور .

إنّ المقطع المدروس هذا ، مقطعاً متخالفاً حول محور شاقولي ، مار من مركز المساحة . تحلّل الحمولة الشاقوليّة ، إلى مركّبات موازية للمحاور الرئيسية ، ومن ثمّ تحسب الإجهادات .

المجاز يساوي (12 m) بمساند حرّة ،

حمولة الثلوج = $(0.75\ KN/m^2)$ على المسقط .

$A = 385 \times 10^3\ m.m^2$

$I_{xx} = 15.8 \times 10^9\ m.m^4$.

$I_{yy} = 348 \times 10^9\ m.m^4$.

الحمولات :

الحمولات الميّتة الكليّة للقشريّة :

$= 25 \times 385 \times 10^3 \times 10^{-6}$

$= 9.6\ KN/m$ امتداد

حمولة الثلج الكليّة :

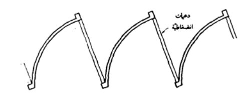
$= 0.75 \times 2.0 = 1.5\ KN/m$.

الحمولة الكليّة :

$= 9.6 + 1.5 = 11.1\ KN/m$.

نحلّل الحمولة الشاقوليّة هذه ، إلى مكوّناتها ، مسقطة على محوري القشريّة (x) و(y) :

كل مركّبة = $11.1 \cos 45° = 7.85\ KN/m.$



الشكل (٣٥ - ٢) : يظهر الشكل سلسلة من القشريات ذات الفتحات الشماليّة .

إذاً عزم الإنعطاف في كل اتجاه :

$$= \frac{7.85 \times (12)^2}{8} = 141 \text{ KNm} .$$

الضغط الأعظمي في القشريّة عند النقطة (B) :

$$Z_{xx} = \frac{15.8 \times 10^9}{330} = 4.8 \times 10^7 \text{ m.m}^3 .$$

إذاً :

$$f_{bc} = \frac{141 \times 10^6}{4.8 \times 10^7} = 2.94 \text{ N/m.m}^2 .$$

الضغط الأعظمي عند النقطة (C) :

$$Z_{xx} = \frac{15.8 \times 10^9}{160} = 9.9 \times 10^7$$

$$Z_{yy} = \frac{384 \times 10^9}{1480} = 23.5 \times 10^7$$

إذاً :

$$f_{bc} = \frac{141 \times 10^6}{23.5 \times 10^7} - \frac{141 \times 10^6}{9.9 \times 10^7} =$$

$= 0.60 - 1.42 = - 0.82 \text{ N/m.m}^2$ (شد)

الشد الأعظمي عند النقطة (A) :

$$Z_{xx} = \frac{15.8 \times 10^9}{360} = 44 \times 10^6$$

$$Z_{yy} = \frac{348 \times 19^9}{1200} = 29 \times 10^7$$

إذاً :

$$f_{bt} = \frac{141 \times 10^6}{44 \times 10^6} + \frac{141 \times 10^6}{29 \times 10^7}$$

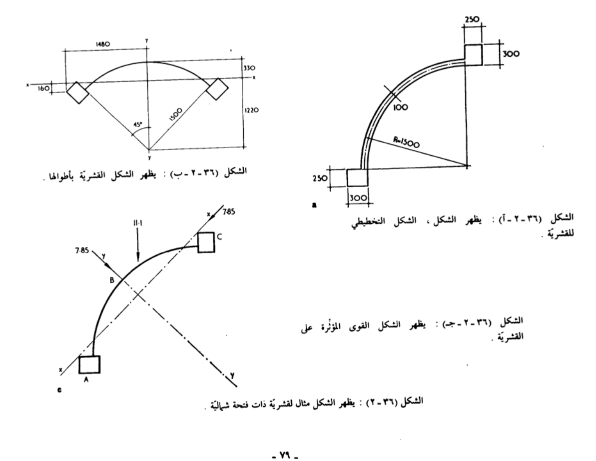
$$= 3.2 + 0.49 = 3.69 \text{ N/mm}^2 .$$

إن افترضنا أنّ الإجهاد ثابت على كامل الجسر ، فإنّ قوّة الشد تساوي : .

$3.69 \times 250 \times 300 \text{ N} = 277 \text{ KN}$.

إن كانت مادّة الإنشاء ، مادّة معدنيّة ، وقدرة تحمُّلها للإجهادات تساوي (200 N/m.m^2) ، فإنّ مساحة مقطع الجسر الكفؤ :

$$= \frac{277 \times 10^3}{200} = 1385 \text{ m.m}^2$$



الشكل (٣٦ ـ ٢ ـ ب) : يظهر الشكل القشريّة بأطوالها .

الشكل (٣٦ ـ ٢ ـ آ) : يظهر الشكل ، الشكل التخطيطي للقشريّة .

الشكل (٣٦ ـ ٢ ـ جـ) : يظهر الشكل القوى المؤثّرة على القشريّة .

الشكل (٣٦ ـ ٢) : يظهر الشكل مثال لقشريّة ذات فتحة شماليّة .

* القطع المكافىء الزائدي :

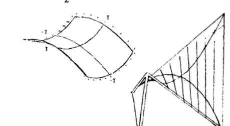
- **7.24** : لنتأمّل القطعين المكافئين (1) و(2) ، المشكِّلين للقطع المكافىء الزائدي ، الموضّح في الشكل (٢٨ - ٢) . كما نلاحظ أنّ القطعين هذين ، قطعان متماثلان ، وكلٌّ منهما يعاكس الآخر . بأخذ وضعيّة التماثل بعين الإعتبار ، نستطيع أن نرى ، أنّه عند تطبيق الحمولة الشاقوليّة (W) ، فإنّ الإجهاد في كل إتجاه ، سيكون متساوياً في القيمة ، متعاكساً في الإشارة . يعمل الغشاء في الشكل (٣٧ - ٢ - آ) ، والمتّجه باتجاه المحور (x) ؛ كما تعمل الأقواس ، وتعمل العناصر في الإتجاه (y) ، كما تعمل الأكبال .

- **7.25** : من المعادلة المدرجة في الفقرة (7.15) ؛ وعند نقطة استناد القشريّة ، تكون الحمولة مساوية لـ :

$$W = \frac{T}{R} + \frac{-T}{-R} = \frac{2T}{R}$$

إذاً :

$$T = \frac{1}{2} WR .$$



الشكل (٣٧ - ٢) : يظهر الشكل قطوع مكافئة زائديّة .

- **7.26** : إن كانت القشريّة ضحلة ، فإنّ اختلافات (R) ، تبقى ثابتة تقريباً ، على كامل السطح ، وبالتالي تبقى محصّلات الإجهاد في كلّ اتجاه ثابتة . لا يوجد أيضاً إجهاد غشائي ، في اتجاه المحورين (x) و(y) . وكما أشرنا سابقاً ، إنّ المستويين عند الزاوية (٤٥°) للمحورين (x) و(y) ، لهما محصّلات إجهاد قص تساوي $\left(\frac{1}{2} . WR\right)$ ، ولكن تظل بمثابة إجهادات لا مباشرة . ذلك يعني أنّنا نستطيع ، حمل حواف القشريّة ، بإنشاء جسور نحيلة ، وظيفتها فقط ، امتصاص إجهادات القص ، شريطة أن تكون الجسور هذه ، تصنع مع محاور القشريّة ، زاوية (٤٥°) ، أنظر الشكل (٣٧ - ٢ - ب) ، وبذلك نستغني عن جسور ضخمة ، كان ينبغي إشادتها ، لكي تعمل على استيعاب قوى الدفع والشد ، الناشئة عن الإجهادات المباشرة . ينبغي أن تكون الجسور هذه أيضاً ، جسوراً مستقيمة ، كما هو موضّح في الشكل (٢٨ - ٢) .

* القبّة نصف الكرويّة :

- **7.27** : إن تأمّلنا غطاء القبّة نصف الكرويّة ، الموضّحة في الشكل (٣٨ ـ ٢) ، لوجدنا أنّ هناك محصِّلة إجهاد ضغط غشائي ، يعمل في إتجاه دائرة الزوال ، ويقع حول القاعدة ، نرمز له بـ (T_1) . إن كان وزن وحدة مادّة القبّة تساوي (W) ، فإنّ تحليل القوى في الإتجاه الشاقولي يعطينا :

$$W \times 2\pi R (1 - \cos \varnothing) = T_1 \sin \varnothing \times 2\pi R \sin \varnothing .$$

$$T_1 = \frac{WR}{1 + \cos \varnothing}$$

- **7.28** : من المعادلة المدوّنة في الفقرة (7.15) ، نستطيع أن نكتب :

$$W\cos\varnothing = \frac{T_1}{R} + \frac{T_2}{R}$$

لهذا :

$$T_2 = WR (\cos \varnothing - \frac{1}{1 + \cos\varnothing}$$

حيث (T_2) هو الإجهاد الحلقي .

- **7.29** : مثال :

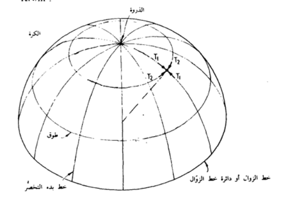
المطلوب حساب الإجهادات لقبّة نصف كرويّة ، قطرها (٢٠) متراً ، وسماكة مادّتها (75 m.m) ، والحمولة ($2.4\ KN/m^2$) .

قيمة الزاوية (∅) عند قمّة القبّة تساوي صفراً .

لذا :

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{2} WR = \frac{1}{2} (2.4) \times 10 = 12$$

KN/m .



الشكل (٣٨ ـ ٢) : يظهر الشكل تحليلاً لقبّة نصف كرويّة .

وبذا تكون إجهادات الضغط الموافقة تساوي :

$$\frac{12000}{1000 \times 75} = 0.16\ N/m.m^2$$

عند خط بدء تخصُّر القبّة ، يصبح إجهاد دائرة الزوال (T_1) مساوياً لـ :

$$T_1 = WR = 24\ KN/m\ .$$

وإجهاد الضغط = $(0.32\ N/m.m^2)$

الإجهاد الحلقي يساوي : $T_2 = -\ WR$

وبالتالي إجهاد الشد يساوي : $(0.32\ N/m.m^2)$.

- 7.30 : يسبِّب الإجهاد الحلقي ، توسُّعاً في امتداد أطراف القبّة ، مما يسبِّب تغيُّراً في البنية الهندسيّة للمنشأة . يمكننا تجنُّب ذلك ، بانشاء جسر حلقي . يعمل الجسر الحلقي ، على حثِّ إجهادات لا غشائيّة في القشريّة ، تقع إلى جوار الجسر ذاك . يستخدم حديد التسليح عند الإجهاد المنخفض ، لتجنُّب الإجهادات اللا غشائيّة هذه ، وللحؤول دون التوسُّع المفرط ، لأطراف القبّة .

- 7.31 : إنْ استخدم الإجهاد الأعظمي المساوي لـ $(200\ N/m.m^2)$ ، فإنّنا سنحصل على زيادة في محيط الدائرة تساوي :

الطول الأصلي × $\frac{\text{الإجهاد}}{E}$

$$= \frac{200}{207} \times 10^3 \times 20000 \times \pi = 60\ m.m\ .$$

مما يسبِّب زيادة في قطر القبّة مقدارها :

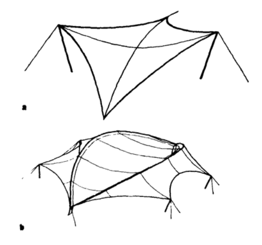
$$\frac{60}{\pi} = 19\ m.m\ .$$

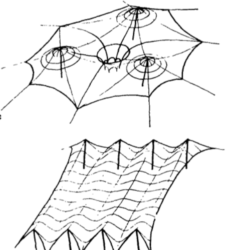
الفصل الثالث

تعاريفُ أساسيّة وجداول حساب معياريّة.

● المقدِّمة :

لابدّ استكمالاً للبحث ، من تحليل النماذج الإنشائيّة المعرّضة مقاطعها لإجهادات شد ، وهذا ما كان . تناولنا أيضاً في هذا الفصل ، قائمة تحوي مجموعة من التعاريف والإصطلاحات ، التي تناولناها في الجزئين الثاني والثالث من موسوعتنا هذه . كما تناول الفصل فكرة عن نظريّة المصفوفات ، وبعض الجداول الخاصّة بحسابات الجسور .





● **منشآت الشد :**

*** تحليل المنشآت المحمولة على أكبال :**

- 1.01 : تتدرج منشآت الشد ضمن نوعين رئيسيين ، أولهما وتدعى المنشآت المحمولة على أكبال ، وثانيهما وتدعى المنشآت الغشائيّة . إنّ أبسط شكل من أشكال المنشآت المحمولة على أكبال ، هو الرابط الشاقولي ، المثبّت من الأعلى ، بحمولة متّجهة نحو الأسفل . يعد الجدار الخارجي والأطراف الخارجيّة لبلاطات الأرضيّة ، المحمولة على روابط شاقوليّة ، متدلاّة من أظفار ضخمة ، متواجدة على منسوب السقف ، والمحمولة بدورها على القلب المركزي الحامل ، شكلاً آخر من أشكال منشآت الشد .

إنّ تحليل أمثال الجمل الإنشائيّة هذه ، يعدُّ عملاً بسيطاً ، ولا يحتاج إلى عناء كبير .

- 1.02 : تستخدم الأكبال لحمل منشآت يراد الإمتداد بها أفقيّاً ، لمسافات كبيرة ، مستفيدين من وزن الأكبال الضئيل نسبيّاً . على أيِّ حال ، ينبغي أن تثبّت الأكبال جيِّداً ، وأن تحوي جمل المنشآت هذه ، على عناصر ضخمة ، لتستطيع تحمُّل الضغوط المفروضة .

- 1.03 : يبلغ طول الكبل الموضّح في الشكل (١ - ٣ - آ) «L» ، ووزنه الذاتي ضئيل ، بما يكفي لإهماله . تبلغ المسافة ما بين نقطتي التثبيت (I) . وتبلغ مسافة ارتخاء الكبل ، نتيجة تأثير حمولة مركزيّة مقدارها (P) ، المسافة (h) .

استناداً إلى نظريّة فيثاغورث ، يمكننا أن نكتب :

$$\frac{L^2}{4} = \frac{I^2}{4} + h^2$$

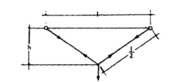
إذاً :

$$L = I\sqrt{1 + 4\frac{h^2}{I^2}}$$

ولكن : (نسبة الإرتخاء = r)

$$r = \frac{h}{I}$$

$$L = I\sqrt{(1 + 4r^2)}$$



الشكل (١ - ٣ - آ) : كبل محمّل بحمولة محوريّة بسيطة .

إذا كانت (r) بسيطة ، أي أنّ مسافة الإرتخاء ، هي مسافة بسيطة ، إذا ما قورنت بطول المجاز ؛ فإنّ :

$$1 + 4r^2 \approx (1 + 2r^2)^2$$

إذاً :

$$L = l\,(1 + 2r^2)$$

- 1.04 : يمكننا أيضاً استخلاص النتائج المترتّبة عن تحمُّل كبل ، لعدد من الحمولات المركّزة ، والموزّعة على مسافات متساوية ، أنظر الشكل (٢ ـ ٣) ، كما يلي :

$$L = l\,(1 + Kr^2)$$

سندرج هنا جدولاً لقيم (K) ، بالمقارنة مع عدد الحمولات :

عدد الحمولات	1	2	3	4	5	6	∞
K	2	3	2.5	2.8	2.6	2.7	2.67

- 1.05 : الآن ، لنتأمّل النظام المشابه لما سلف ، والموضّح في الشكل (١ ـ ٣ ـ ب) . لنحلّل القوى شاقوليّاً ، وذلك عند نقطة تعليق الحمولة :

$$2T\sin\varnothing = P$$

تحلّل قوّة الشد في الكبل ، إلى مركّبة أفقيّة (H) ، وشاقوليّة (V) ، حيث :

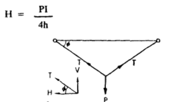
$$H = T\cos\varnothing = \frac{P}{2\tan\varnothing}$$

لكن :

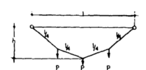
$$\tan\varnothing = \frac{2h}{l}$$

إذاً :

$$H = \frac{Pl}{4h}$$



الشكل (١ ـ ٣ ـ ب) : يظهر الشكل مخطّط القوى .



الشكل (٢ ـ ٣) : يظهر الشكل كبلاً محمّلاً بعدد من الحمولات المتساويّة ، والتي تحصر فيما بينها مسافات متساويّة .

إنّ المقدار $\left(\frac{Pl}{4}\right)$ ، يمثّل العزم في وسط الكبل (M_s) ، الناتج عن جسر ذو استناد بسيط ، طول مجازه (l) ، ومعرّض لحمولة مركّزة قيمتها (P) . يمكننا أيضاً ملاحظة ذات الشيء ، تحت وطأة ظروف تحميل مغايرة ، أي :

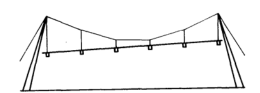
$$H = \frac{M_s}{h}$$

لهذا ، فإنّ كبلاً تحت وطأة حمولة شاقوليّة موزّعة بانتظام ، يتعرّض لزيادات في الإتجاه الأفقي ، تتخذ شكل قطع مكافىء ، وقيمتها عند كل نقطة تساوي :

$$H = \frac{Wl^2}{8h}$$

إذا كان الكبل ذي وزن ثقيل ، فإن له من وزنه الذاتي ، حمولات شاقوليّة ، موزّعة بانتظام ، تسبّب زيادات تتم على طول منحني الكبل ، مما تجعل الكبل يتّخذ شكل منحني السلسلة ، ومنحني السلسلة هذا تعريفاً ، هو المنحني الذي تأخذه سلسلة منتظمة ، إذا علّقت من طرفيها تعليقاً حرّاً .

1.06 - : أصبح واضحاً الآن ، أنّ تغيُّرات الصورة الجانبيّة ، لكبل محمّلٍ بعدد من الحمولات المتماثلة ، هي تغيٍّرات تتم وفقاً للتغيرات الطارئة على الحمولات هذه . لهذا يكون من غير المناسب تعليق السقف ، بكبل وحيد ، كما هو موضّح في الشكل (٣ ـ ٣) ، وذلك بسبب ما يمكن أن يطرأ من تغيٍّرات مفاجئة ، على شكل السقف ، نتيجة هبوب رياح قويّة مثلاً ، أو تساقط ثلوج بكميّات موزّعة على سطح السقف عشوائياً ، مما سيؤدي حتماً ، إلى انهيار السقف ، وبشكل مفاجىء .



الشكل (٣ ـ ٣) : يظهر الشكل منشأة محمولة على كبل قيد الإنهيار

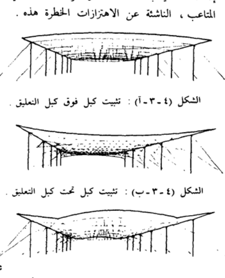
- **1.07** : توجد ثلاثة أساليب للتغلُّب على الظروف هذه وهي :

١ ـ نعمل على زيادة الوزن الذاتي للحمولات المعلّقة . فعلى الرغم من المثالب الواضحة للطريقة هذه ، إلا أنّها قادرة على تقليص فعّاليّة الحمولات الطارئة .

٢ ـ تشدُّ كلُّ حمولة بأكبال ثانوية . تقوم الأكبال هذه ، بتلقي الحمولات الطارئة ، وتعمل على الحفاظ على شكل الجملة الأساسي . ليس بالإمكان دوماً فعل ذلك ، بالإضافة إلى أنّ حلاً كهذا ، قد يعدُّ في بعض الأحيان ، حلاً غير ملائم .

٣ ـ الطريقة الثالثة وتعتمد على استخدام كبل متعدِّد العناصر ، مرتّب وفق نظام معيّن ، تتكامل فيه عناصر الكبل هذا ، لتكون بمثابة إجهاد مسبق ، يزيد من متانة الكبل الرئيسي . يوضح الشكل (٤ ـ ٣) ، التطبيقات العمليّة للطرق الثلاث هذه .

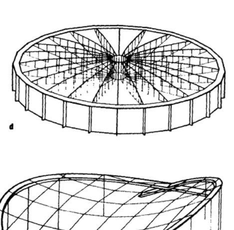
- **1.08** : يقدِّم تحليل أنظمة وجمل كهذه ، تعريفاً للتأثيرات الثانويّة ، المسبِّبة لاهتزاز الأكبال المحمّلة ، اهتزازات دوريّة . إنّ دراسة اهتزازات المنشأة ككل ، واهتزازات كلِّ جزء من المنشأة على حدى ، نتيجة تعرُّضها لحمولات طبيعيّة ، يتم تلقيها وفق فواصل زمنيّة متساوية ، لهو أمر هام ، خصوصاً إن كانت الإهتزازات التردُّدية هذه ، نتيجة لتلقي المنشأة لهبّات ريح عاصفة ، تتكرّر وفق فواصل زمنيّة ، لا تزيد على الثواني الثلاث ، إذ عندها سيكابد السقف ، أو جزءاً منه ، الكثير من المتاعب ، الناشئة عن الاهتزازات الخطرة هذه .



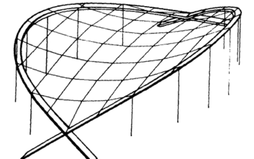
الشكل (٤ ـ ٣ ـ آ) : تثبيت كبل فوق كبل التعليق .

الشكل (٤ ـ ٣ ـ ب) : تثبيت كبل تحت كبل التعليق .

الشكل (٤ ـ ٣ ـ جـ) : تثبيت كبل بشكل جزئي أسفل كبل التعليق .



الشكل (٤ ـ ٣ ـ د) : كبل على شكل إطار دَراجة .

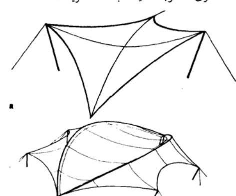


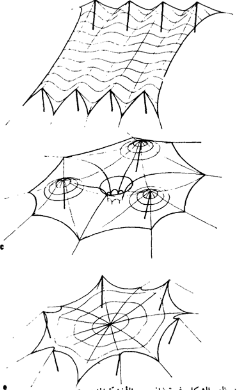
الشكل (٤ ـ ٣ ـ هـ) : نظام قوسي مع شبكة أكبال .

الشكل (٤ ـ ٣) : يظهر الشكل الأساليب المتّبعة لتقوية الأكبال المحمّلة .

* الأغشيّة المشدودة :

1.09– : لقد قلنا سابقاً ، أنّ الأغشيّة الحقيقيّة ، تستطيع فقط تحمُّل قوى الشد . إلاّ أنّه أثناء التعامل مع القشريّات الرقيقة ، ينبغي أن نأخذ بعين الإعتبار ، كلّ ما يجعل تلك القشريّات ، أهلاً لتحمُّل كميّة ما ، من قوى الضغط . على كلٍّ حال ، نستطيع أن نضع القشريّات الرقيقة بالكامل ، في حالة توتُّر دائم ، عن طريق تعريضها لإجهادات مسبقة . يوضِّح الشكل (٥ ـ ٣) ، منشآت غشائيّة ، على شكل قطوع زائدة ، عولجت بالطريقة هذه . كما يحوي الشكل ، أشكالاً أخرى ، عولجت أيضاً بذات الطريقة .





الشكل (٥ ـ ٣) : يظهر الشكل خمسة نماذج من الأغشيّة المشدودة ، إحداها على شكل قطع مكافىء زائدي وهي المرموز لها بـ(a) .

● موجز نظريّة المصفوفات :

2.01– : سنقدِّم فيما يلي ، عرضاً موجزاً لنظريّة المصفوفات ، آملين أن يكون كافياً ، لفهم المثال ، الذي جرى تناوله ، عند حلِّ الإطار الحامل بطريقة مُعَامِلات التأثير .

2.02– : لنتأمّل قائمة المعادلات الآنيّة التالية :

$a_1x+b_1y+c_1z=u_1$

$a_2x+b_2y+c_2z=u_2$

$a_3x+b_3y+c_3z=u_3$

حيث : (x)، (y) و (z) مقادير مجهولة ؛ و (a_1)،(a_2)،(b_1)،(c_1)،(u_1) إلخ . . . هي مُعَامِلات معلومة القيم ، تحوي قيمها مجموعة الأعداد العاديّة .

2.03– : يمكننا كتابة مجموعة المعادلات السابقة ، وفق الشكل التالي :

$$\begin{matrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{matrix} \quad \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \; = \; \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{matrix}$$

ويمكن عندها الإشارة إليها على الشكل التالي :

$$A \times X = U$$

2.04– : هنا قيم (A)،(X) و (U) ، ليست بقيم عدديّة ، بل هي عبارة عن مصفوفات مؤلّفة من مجموعة من الأعداد المرتّبة بطريقة خاصّة . تمتثل مقادير المصفوفة هذه ، للعديد من القواعد الحسابيّة المعروفة ، ولذلك يمكننا كتابة العلاقة التالية :

$$X = A^{-1} \times U$$

إن (A^{-1}) هي معكوس (A) ، ونحن نستطيع حسابها بالطرق العاديّة ، ولكن يحبّذ إن كانت مصفوفتها كبيرة ، حسابها بواسطة الحاسوب .

2.05– : تدعى العبارات ضمن المصفوفة ، عناصر المصفوفة . ترتّب العناصر هذه وفق أعمدة وصفوف ، يعبّر عنها كتابة بـ (g_{mn}) ، حيث (m) هو رقم الصف و(n) هو رقم العمود المشغول بالعنصر . لهذا يمكن كتابة المصفوفة التي في الأعلى ، على الشكل التالي :

$$\begin{matrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{matrix}$$

2.06– : إذا كانت (g_{mn}) تساوي دوماً (g_{nm}) ، فإنّ المصفوفة متماثلة . تسمّى العناصر : $g_{11}, g_{22}, g_{33}, g_{mm}$ ، عناصر قطريّة رئيسيّة .

2.07– : لضرب مصفوفتين ببعضهما ، نضرب العنصر الأوّل من الصف الأوّل في المصفوفة (A) ، بالعنصر الأوّل في المصفوفة (B) ، كما نضرب العنصر الثاني من الصف الأوّل للمصفوف (A) ، بالعنصر الثاني من العمود الأوّل للمصفوفة (B) ، وهكذا إلى أن تنتهي عمليّات ضرب كافّة عناصر الصف الأوّل من المصفوفة (A) ، بكافّة عناصر العمود الأوّل من المصفوفة (B) ، كلاً بنظيرها . بعدئذ تجمع كافة المقادير معاً ، لنحصل على العنصر الأوّل من الصف والعمود الأوّل للمصفوفة الجديدة .

1.08– : إذا أردنا على سبيل المثال . إيجاد حاصل ضرب المصفوفة (A) بـ(B) نكتب :

$C=A\times B$

$c_{11}=a_{11}\times b_{11}+a_{12}\times b_{21}+a_{13}\times b_{31}+.....$

$c_{mn}=a_{m1}\times b_{1n}+a_{m2}\times b_{2n}+a_{m3}\times b_{3n}+.....$

لاحظ أنّ (A×B) ليست بالضرورة ، مساويّة لـ (B×A) .

●قائمة تعاريف :

3.01– : تعد القائمة هذه ، قائمة تعاريف تتضمّن مجموعة هامّة من الرموز والعبارات ، تناولناها بالبحث والتفصيل ، من خلال الجزأين الثاني والثالث . وبذا نكون قد كثّفنا المعلومات الأساسيّة ، التي يمكن لها مساعدة المعماري ، في تبيّن ما إذا كانت المنشأة المصمّمة من قبله ، صالحة للتنفيذ ، أم هي ضرب من الخيال .

:A–

ويدل على مساحة المقطع المار من العنصر الإنشائي .

:b–

ويدل الرمز على عرض المقطع المار من العنصر الإنشائي .

:B_y–

ويدل الرمز على مساحة جزء من مقطع عنصر إنشائي ، يقع فوق خط ، يبعد مسافة (y) عن المحور المحايد باتجاه الأعلى .

ـ الجسر :

تدل اللفظة على عنصر إنشائي ، خاضع في المقام الأوّل ، لإجهادات انحنائيّة .

ـ طريقة بوا :

هي طريقة لإيجاد القوى المؤثّرة على العناصر المكوِّنة لجائز شبكي ، غير مقرّر سكونياً .

ـ جسر ظفري :

وهو جسر محمول بشكل كامل ، من طرف واحد .

ـ فائض العزم :

وهو عزم يتواجد في كلِّ عقدة بعد تحريرها ، وإجراء عمليتي التوزيع والنقل ، وهو مفهوم نصدفه عندما يراد حلُّ جائز مستمر بطريقة توزيع العزوم .

ـ مركز المساحة :

هي نقطة واقعة على المقطع ، بحيث يكون دوماً قيمة العزم الأوّل ، حول أيِّ محور مار من تلك النقطة مساوياً الصفر .

ـ دمج المخطّطات معاً :

هو أسلوب حسابي مستخدم في حلِّ الأطر ، عن طريق استخدام طريقة معامل التأثير .

ـ مركّبة :

وهي جزء من القوّة ، تعمل في إتجاه آخر

ـ جسر مستمر :

وهو جسر محمول على أكثر من مسندين اثنين .

ـ المزدوجة :

وهي قوّتان تعملان في مستو واحد ، متساويتان في الشدة ، متعاكستان في الإتجاه ، تحدث في المستوي عزماً صافياً .

d– :

ويدل الرمز على ارتفاع مقطع عنصر إنشائى .

ـ التشوُّه :

هو مقدار ابتعاد نقطة من عنصر إنشائي ، عن موضعها الأصلي ، نتيجة تعرُّض العنصر هذا ، إلى حمولة ما .

e– :

يدلُّ الرمز على مسافة ابتعاد نقطة تطبيق الحمولة ، عن محور مقطع العمود .

-e:

يدلُّ الرمز إلى مقدار الإنفعال الناشيء ضمن عنصر إنشائي وهو يساوي النسبة :مقدار التمدُّد/الطول الأصلي .

-E:

عامل يونغ ، وهو يساوي الإجهاد/الإنفعال .

- حدُّ المرونة :

هو الإجهاد الأقصى الذي يمكن أن ينتج أثناء اختبار شد بسيط ، بحيث لا يكون هناك تشكُّل دائم أو متبق ، بعد إزالة الحمل بالكامل .

- القبّة :

نوع من أنواع المنشآت الغشائيّة .

- الجسر موثوق الطرفين :

وهو جسر موثوق الطرفين ، وفي وضع أفقي .

- عزوم الطرف الثابت :

وهي العزوم المتولِّدة عند نهايات المجازات ، بعد إغلاقها وهي قيم نصدفها عند حلِّ الجوائز وفقاً لأسلوب توزيع العزوم .

- القوّة الموازنة :

وهي قوّة تضاف إلى مجموعة من القوى غير المتوازنة ، بهدف إعادتها إلى حالة التوازن .

- حمل أويلر للانبعاج :

وهو الحمل الحرج لعمود طويل ونحيف ويعطى بالعلاقة :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

حيث تمثِّل (E) معامل المرونة و (I) أقل قيمة للعزم الثاني للمساحة لمساحة المقطع المستعرض حول محور يمر من مركز ثقل المساحة ، «L» هو طول القضيب . إنّ هذه المعادلة لا تكون صحيحة ، إلا في حالة الأعمدة التي تزيد نسبة نحافتها عن (100) ، وبذا تكون قيمة (P_{cr}) المعطاة من هذه المعادلة تمثِّل حمل الإنهيار .

-f:

إجهاد مباشر ، سواء أكان إجهاد ضغط أو شد .

-f_a:

يدلُّ الرمز على إجهاد مباشر ناتج عن قوّة مطبّقة عند مركز المساحة .

:f_{bx}–

يدلُّ الرمز على إجهاد مباشر ناتج عن عزوم مأخوذة حول المحور «x» .

:f_{by}–

يدلُّ الرمز على إجهاد مباشر ناتج عن عزوم مأخوذة حول المحور «y» .

ـ العزم الأول للمساحة «G» :

يعطى العزم الأوّل لعنصر من مساحة حول أيٍّ محور في مستوي المساحة ، بحاصل ضرب مساحة العنصر في المسافة العموديّة بين العنصر والمحور .

ـ القوّة :

هي ظاهرة غير معرّفة ، تعرف بتأثيراتها .

ـ عزم انعطاف المجاز الحر :

على جسر في منشأة غير مقررّة توازنياً ، يتولّد عزم إذا كان استناد الجسر بسيطاً .

g_{11}– إلخ . . . :

هي مجموعة مُعَامِلات التأثير .

:G–

يدلُّ الرمز على العزم الأوّل للمساحة حول محور معطى .

:G_x–

يدلُّ الرمز على مصفوفة المرونة المستخدمة لحلِّ الجوائز والأطر وفق طريقة مُعَامِلات التأثير .

ـ أسلوب هاردي كروس :

وهو الإسم البديل لأسلوب توزيع العزم .

:I–

هو العزم الثاني لمساحة مقطع حول محور معطى ، ويسمى أحياناً بعزم العطالة .

:I_x–

يدلُّ الرمز على العزم الثاني حول المحور «x» ويساوي «$y^2 \times \delta A$» .

:I_{xy}–

يدلُّ الرمز على ناتج العطالة ويساوي «$x \times y \times \delta A$» .

ـ مُعَامِلات التأثير :

وهو أسلوب تحليلي يستخدم لحلِّ منشآت مستمرّة ذات بعدين .

- **توزيع العزم :**

أسلوب تكراري لتحليل منشأة مستمرّة ذات بعدين .

- **عزم العطالة :**

هو العزم الثاني لمساحة مقطع .

- N_{ϕ}:

يدلُّ الرمز على القوّة الحلقيّة في قبّة .

- **المحور المحايد :**

هو المحور المار من مركز مساحة المقطع .

- **العقدة :**

هي نقطة من منشأة يتلاقى فيها عنصرين أو أكثر من منشأة مقتطعة بمحور طولي .

- P:

يدلُّ الرمز على قوّة أو حمولة مركّزة .

- **التشوُّه اللدن :**

هو زيادة التشوُّهات باستمرار تحت وطأة إجهاد غير متغيِّر .

- **نسبة بواصون «σ» :**

وهي النسبة بين الإنفعال في الإتجاه العرضي والعمودي على الحمل ، إلى الانفعال في اتجاه المحور .

- **المنشآت التضاغطيّة :**

وهي منشآت يمكننا حساب وتحديد كافة قواها ، باستخدام قوانين التوازن فحسب .

- j,k:

ثوابت تستخدم في نظريّة العزوم .

- L:

يدلُّ الرمز على طول العنصر الإنشائي ، المحدّد بعقدتين .

- $\mathcal{M}$:

يدلُّ الرمز على العزوم بمختلف أنواعها ؛ والعزم **تعريفاً هو نتاج شدّة القوة بالمسافة المحصورة مابين نقطة تأثير القوة وبين النقطة أو الخط المأخوذ حوله العزم .**

- $\mathcal{M}_x$:

يدلُّ الرمز على عزم الإنعطاف حول المحور «x» .

- **العنصر :**

هو الوحدة المكوِّنة للمنشأة .

- **غشاء :**

هي قشريّة نحيلة جداً بحيث لا تملك أيَّ مقاومة على الإنثناء .

ـ الإجهادات الرئيسية :

هي إجهادات مباشرة في مستويات إجهادات القص فيها تساوي صفراً.

ـ عنصر موشوري أو منشوري :

هو عنصر تبقى مقاطعه العرضيّة ثابتة على طول محورها الطولي .

:r–

رمز يدلُّ على نصف قطر الحركة التدويميّة ويساوي $\sqrt{\frac{I}{A}}$

:R–

رمز يدلُّ على نصف قطر الإنحناء .

:R–

رمز يدلُّ على رد الفعل .

ـ المنشأة المحرّرة :

هي الترجمة التضاعطيّة لإطار غير مقرر توازنياً ، ناتج عن تحرير قيوده .

ـ التحليل :

مقدار مركّبات القوى في اتجاه معطى .

ـ القيد :

يولِّد القيد قوّة فائضة تجعل من المنشأة منشأة غير مقررة توازنياً .

ـ محصِّلة :

هي قوّة وحيدة لها تأثير مشابه لمجموعة من القوى .

ـ الدوران :

حركة دورانيّة .

:s–

رمز يدلُّ على إجهاد القص .

:S–

رمز يدلُّ على قوّة القص .

ـ العزم الثاني للمساحة :

عزم عطالة المقطع .

ـ المقطع :

الشكل الناتج عن مقطع مار من عنصر .

ـ مركز القص :

هي نقطة من مقطع عرضي ، يمكن من خلالها التأثير بالأحمال العرضيّة بحيث ينتج انحناء فقط دون التواء .

ـ نسبة النحافة :

وهي النسبة بين طول العمود إلى أقل نصف قطر للحركة التدويميّة لمساحة المقطع العرضي للعمود أي :

نسبة النحافة = $\frac{L}{r}$.

ـ الصلابة :

للجسر أو العمود تساوي $\frac{KEI}{L}$ ، حيث

(K) ثابت متعلّق بنوعيّة الجسر .

ـ الإجهاد :

هو ما يسمّى بالتأثيرات الداخليّة للقوى المؤثّرة على الجسم شداً أو ضغطاً .

ـ مسار الإجهاد :

خط يوضّح اتجاه الإجهاد الرئيسي .

ـ الإنفعال :

هي مقدار استطالة وحدة الأطوال وتساوي :

التمدُّد/الطول = e .

ـ الدعمة الإنصغاطيّة :

عنصر إنشائي واقع تحت تأثير إجهادات ضغط صرفة .

ـ اللي أو الفتل :

هو عزم متواجد في مستوى المقطع يعمل على ليٍّ العنصر .

:U–

رمز يدلُّ على الحلِّ الخاص للحمولة ، مستخدم في طريقة مُعَامِلات التأثير .

:w–

حمولة موزّعة بانتظام لكل وحدة طول من وحدات طول جسر ما .

:W–

رمز يدلُّ على وزن الجسم أو على حمولة مركزة .

:X–

في طريقة مُعَامِلات التأثير ، يدلُّ هذا على عمود مصفوفة القيود أو الوثاقات .

ـ المحور (X) :

هو عادة المحور الأفقي في مستوي مقطع العنصر .

ـ المحور (Y) :

هو عادة المحور الشاقولي في مستوي مقطع العنصر .

ـ المحور (Z) :

هو عادة المحور الأفقي في مستوي واجهة العنصر .

ـ مُعَامِل يونغ :

ويسمّى مُعَامِل المرونة ويساوي : الإجهاد/الإنفعال

E = .

:Z_x-

رمز يدلُّ على مُعَامِل المقطع حول المحور «x»

ويساوي : $\frac{I_x}{y_{max}}$.

●جداول لحلّ جسور نموذجيّة :

4.01- : ترتِّب الجداول هذه ، صيغ وقيم العزوم ($\mathcal{M}$) ، ردود الأفعال (R) ، قوى القص (S) ، والتشوُّهات (δ) الحاصلة في الجسور ، نتيجة تعرُّضها لعدد من الحمولات الشائعة ، والمحمولة على مساند ذات طبيعة محدّدة . تغطي الجداول هذه : الجسور الظفريّة ، جسور محمولة على مساند حرّة الحركة ، جسور موثوقة الطرفين ، والجسور الظفريّة المدعومة .

* الجسور الظفريّة

$$M_x = \frac{Wx^2}{2a} \qquad M_{max} = \frac{Wa}{2}$$

$$S_{max} = R_L = W$$

$$\delta_M = \frac{Wa^3}{8EI}$$

$$\delta_{max} = \delta_R = \frac{Wa^3}{8EI} \times \left(1 + \frac{4b}{3a}\right)$$

$$M_{max} = W\left(a + \frac{b}{2}\right)$$

$$S_{max} = R_L = W$$

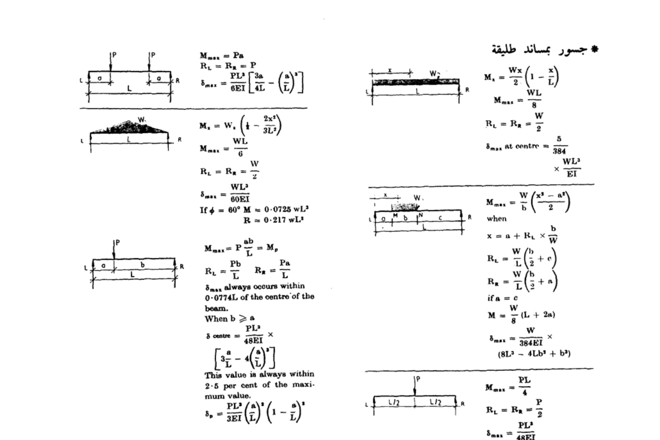
$$\delta_{max} = \delta_R = \frac{W}{24EI}(8a^3 + 18a^2 b + 12ab^2 + 3b^3)$$

$$M_x = P_x \qquad M_{max} = Pa$$

$$S_{max} = R_L = P$$

$$\delta_M = \frac{Pa^3}{3EI}$$

$$\delta_{max} = \delta_R = \frac{Pa^3}{3EI} \times \left(1 + \frac{3b}{2a}\right)$$



* جسور بمساند طليقة

$$M_x = \frac{Wx}{2}\left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

$$M_{max} = \frac{WL}{8}$$

$$R_L = R_R = \frac{W}{2}$$

δ_{max} at centre $= \frac{5}{384} \times \frac{WL^3}{EI}$

$$M_{max} = \frac{W}{b}\left(\frac{x^2 - a^2}{2}\right)$$

when

$$x = a + R_L \times \frac{b}{W}$$

$$R_L = \frac{W}{L}\left(\frac{b}{2} + c\right)$$

$$R_R = \frac{W}{L}\left(\frac{b}{2} + a\right)$$

if $a = c$

$$M = \frac{W}{8}(L + 2a)$$

$$\delta_{max} = \frac{W}{384EI} \times (8L^3 - 4Lb^2 + b^3)$$

$$M_{max} = \frac{PL}{4}$$

$$R_L = R_R = \frac{P}{2}$$

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}$$

$$M_{max} = Pa$$

$$R_L = R_R = P$$

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{6EI}\left[\frac{3a}{4L} - \left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$$

$$M_x = W_x\left(\frac{1}{2} - \frac{2x^2}{3L^2}\right)$$

$$M_{max} = \frac{WL}{6}$$

$$R_L = R_R = \frac{W}{2}$$

$$\delta_{max} = \frac{WL^3}{60EI}$$

If $\phi = 60°$ $M = 0{\cdot}0725\ wL^3$

$R = 0{\cdot}217\ wL^2$

$$M_{max} = P\frac{ab}{L} = M_p$$

$$R_L = \frac{Pb}{L} \qquad R_R = \frac{Pa}{L}$$

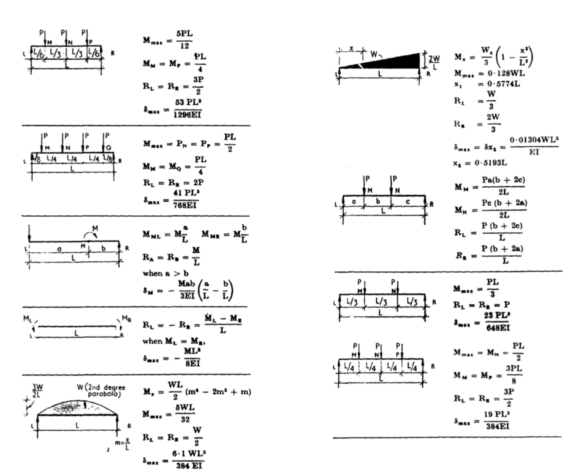
δ_{max} always occurs within $0{\cdot}0774L$ of the centre of the beam.

When $b \geqslant a$

$$\delta_{centre} = \frac{PL^3}{48EI} \times \left[3\frac{a}{L} - 4\left(\frac{a}{L}\right)^3\right]$$

This value is always within 2·5 per cent of the maximum value.

$$\delta_p = \frac{PL^3}{3EI}\left(\frac{a}{L}\right)^2\left(1 - \frac{a}{L}\right)^2$$



$$M_{max} = \frac{5PL}{12}$$
$$M_M = M_P = \frac{PL}{4}$$
$$R_L = R_R = \frac{3P}{2}$$
$$\delta_{max} = \frac{53\,PL^3}{1296EI}$$

$$M_{max} = P_N = P_P = \frac{PL}{2}$$
$$M_M = M_Q = \frac{PL}{4}$$
$$R_L = R_R = 2P$$
$$\delta_{max} = \frac{41\,PL^3}{768EI}$$

$$M_{ML} = M\frac{a}{L} \qquad M_{MR} = M\frac{b}{L}$$
$$R_A = R_B = \frac{M}{L}$$
when $a > b$
$$\delta_M = -\frac{Mab}{3EI}\left(\frac{a}{L} - \frac{b}{L}\right)$$

$$R_L = -R_R = \frac{M_L - M_R}{L}$$
when $M_L = M_R$,
$$\delta_{max} = -\frac{ML^2}{8EI}$$

$$M_x = \frac{WL}{2}(m^4 - 2m^3 + m)$$
$$M_{max} = \frac{5WL}{32}$$
$$R_L = R_R = \frac{W}{2}$$
$$\delta_{max} = \frac{6 \cdot 1\,WL^3}{384\,EI}$$

$$M_x = \frac{W_x}{3}\left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right)$$
$$M_{max} = 0 \cdot 128WL$$
$$x_1 = 0 \cdot 5774L$$
$$R_L = \frac{W}{3}$$
$$R_R = \frac{2W}{3}$$
$$\delta_{max} = \delta x_2 = \frac{0 \cdot 01304WL^3}{EI}$$
$$x_2 = 0 \cdot 5193L$$

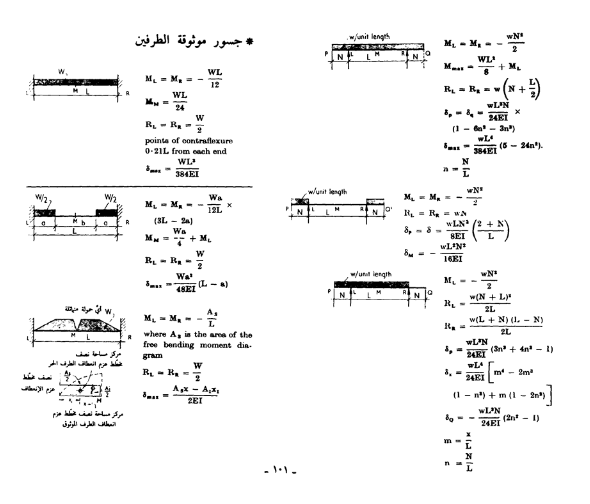
$$M_M = \frac{Pa(b + 2c)}{2L}$$
$$M_N = \frac{Pc\,(b + 2a)}{2L}$$
$$R_L = \frac{P\,(b + 2c)}{L}$$
$$R_R = \frac{P\,(b + 2a)}{L}$$

$$M_{max} = \frac{PL}{3}$$
$$R_L = R_R = P$$
$$\delta_{max} = \frac{23\,PL^3}{648EI}$$

$$M_{max} = M_N = \frac{PL}{2}$$
$$M_M = M_P = \frac{3PL}{8}$$
$$R_L = R_R = \frac{3P}{2}$$
$$\delta_{max} = \frac{19\,PL^3}{384EI}$$

---

* جسور موثوقة الطرفين



$M_L = M_R = -\frac{WL}{12}$

$M_M = \frac{WL}{24}$

$R_L = R_R = \frac{W}{2}$

points of contraflexure 0·21L from each end

$\delta_{max} = \frac{WL^3}{384EI}$

$M_L = M_R = -\frac{Wa}{12L} \times (3L - 2a)$

$M_M = \frac{Wa}{4} + M_L$

$R_L = R_R = \frac{W}{2}$

$\delta_{max} = \frac{Wa^2}{48EI}(L - a)$

$M_L = M_R = -\frac{A_s}{L}$

where A_s is the area of the free bending moment diagram

$R_L = R_R = \frac{W}{2}$

$\delta_{max} = \frac{A_s x - A_1 x_1}{2EI}$

$M_L = M_R = -\frac{wN^2}{2}$

$M_{max} = \frac{wL^2}{8} + M_L$

$R_L = R_R = w\left(N + \frac{L}{2}\right)$

$\delta_p = \delta_q = \frac{wL^3N}{24EI} \times (1 - 6n^2 - 3n^3)$

$\delta_{max} = \frac{wL^4}{384EI}(5 - 24n^2).$

$n = \frac{N}{L}$

$M_L = M_R = -\frac{wN^2}{2}$

$R_L = R_R = wN$

$\delta_P = \delta = \frac{wLN^3}{8EI}\left(\frac{2 + N}{L}\right)$

$\delta_M = -\frac{wL^2N^2}{16EI}$

$M_L = -\frac{wN^2}{2}$

$R_L = \frac{w(N + L)^2}{2L}$

$R_R = \frac{w(L + N)(L - N)}{2L}$

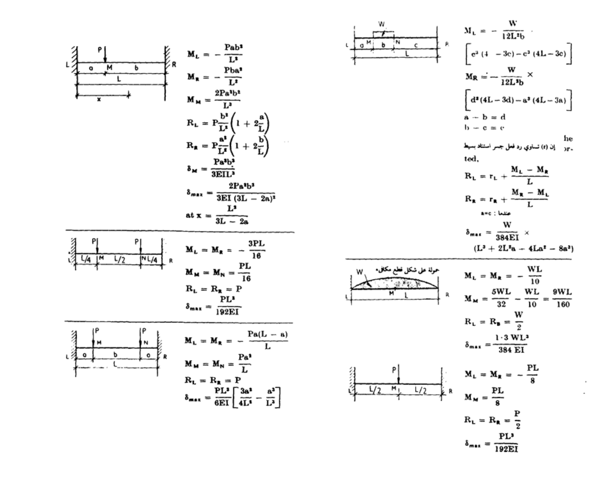
$\delta_p = \frac{wL^3N}{24EI}(3n^3 + 4n^2 - 1)$

$\delta_x = \frac{wL^4}{24EI}\left[m^4 - 2m^3(1 - n^2) + m(1 - 2n^2)\right]$

$\delta_Q = -\frac{wL^3N}{24EI}(2n^2 - 1)$

$m = \frac{x}{L}$

$n = \frac{N}{L}$



P
L a M b R
L
x
$M_L = -\frac{Pab^2}{L^2}$
$M_R = -\frac{Pba^2}{L^2}$
$M_M = \frac{2Pa^2b^2}{L^3}$
$R_L = P\frac{b^2}{L^2}\left(1 + 2\frac{a}{L}\right)$
$R_R = P\frac{a^2}{L^2}\left(1 + 2\frac{b}{L}\right)$
$\delta_M = \frac{Pa^3b^3}{3EIL^3}$
$\delta_{max} = \frac{2Pa^3b^2}{3EI\,(3L - 2a)^2}$
$\text{at } x = \frac{L^2}{3L - 2a}$
P P
L L/4 M L/2 N L/4 R
$M_L = M_R = -\frac{3PL}{16}$
$M_M = M_N = \frac{PL}{16}$
$R_L = R_R = P$
$\delta_{max} = \frac{PL^3}{192EI}$
P P
M N
L a b a R
L
$M_L = M_R = -\frac{Pa(L - a)}{L}$
$M_M = M_N = \frac{Pa^2}{L}$
$R_L = R_R = P$
$\delta_{max} = \frac{PL^3}{6EI}\left[\frac{3a^2}{4L^2} - \frac{a^3}{L^3}\right]$
W
L a M b N c R
L
$M_L = -\frac{W}{12L^2b}$
$\left[e^3 (4 \quad - 3c) - c^3 (4L - 3c)\right]$
$M_R = -\frac{W}{12L^2b} \times$
$\left[d^2 (4L - 3d) - a^3 (4L - 3a)\right]$
$a - b = d$
$b - c = e$
he
إن (r) تساوي رد فعل جسر استناد بسيط or-
ted,
$R_L = r_L + \frac{M_L - M_R}{L}$
$R_R = r_R + \frac{M_R - M_L}{L}$
عندما : a=c
$\delta_{max} = \frac{W}{384EI} \times$
$(L^3 + 2L^2a - 4La^2 - 8a^3)$
W حولة على شكل قطع مكافئ
L M L R
$M_L = M_R = -\frac{WL}{10}$
$M_M = \frac{5WL}{32} - \frac{WL}{10} = \frac{9WL}{160}$
$R_L = R_R = \frac{W}{2}$
$\delta_{max} = \frac{1 \cdot 3\,WL^3}{384\,EI}$
P
L L/2 M L/2 R
$M_L = M_R = -\frac{PL}{8}$
$M_M = \frac{PL}{8}$
$R_L = R_R = \frac{P}{2}$
$\delta_{max} = \frac{PL^3}{192EI}$

$b_1 = \frac{b}{L}$

$x_1 = \frac{x}{L}$

$$M_L = -\frac{Wb}{8}(2 - b_1^2)$$

$$M_M = \frac{Wb}{8}(6b_1 - b_1^2 - 4)$$

$$M = 0 \text{ where } x_1 = \frac{2 - b_1^2}{6 - b_1^2}$$

$$R_L = \frac{Wb_1}{8}(6 - b_1^2)$$

$$R_R = \frac{W}{8}(b_1^3 - 6b_1 + 8)$$

إذا كانت : $x \leqslant a$ فإن :

$$\delta = \frac{WbL^3}{48EI} \times$$

$$\left[(b_1^2 - 6)\, x_1^3 - (3b_1^2 - 6)x_1^2\right]$$

إذا كانت : $x \geqslant a$ فإن :

$$= \frac{WL^4}{48EI} \times$$

$$\left[2p^4 - p^2 b_1 (b_1^3 - 6b_1 + 8) + pb_1^2(3b_1^2 - 8b_1 + 6)\right]$$

حيث $p = 1 - x_1$

$$M_L = -\frac{W}{8L^2b}(d^2 - c^2) \times (2L^2 - c^2 - d^2)$$

حيث $d = b + c$

$$M_L = M_R = -\frac{2PL}{9}$$

$$M_M = M_N = \frac{PL}{9}$$

$$R_L = R_R = P$$

$$\delta_{max} = \frac{5PL^3}{648EI}$$

$$M_L = M_R = -\frac{19PL}{72}$$

$$M_N = \frac{11PL}{72}$$

$$R_L = R_R = \frac{3P}{2}$$

$$\delta_{max} = \frac{41PL^3}{5184EI}$$

$$M_L = M_R = -\frac{5PL}{16}$$

$$M_N = \frac{3PL}{16}$$

$$R_L = R_R = \frac{3P}{2}$$

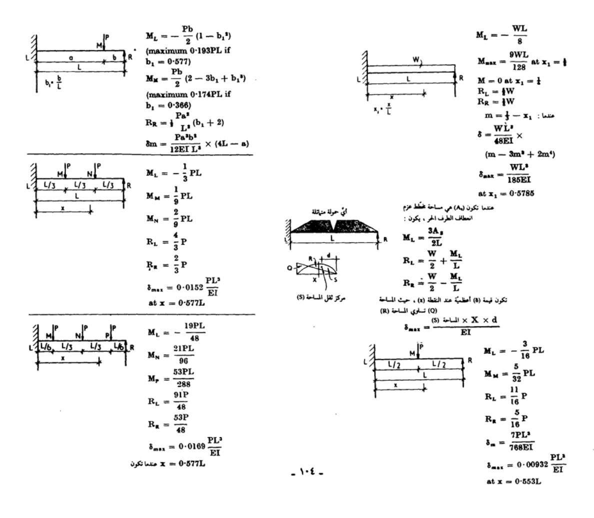
$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{96EI}$$

$$M_L = M_R = -\frac{11PL}{32}$$

$$M_N = M_P = \frac{5PL}{32}$$

$$R_L = R_R = 2P$$

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{96EI}$$



$$M_L = -\frac{Pb}{2}(1 - b_1^2)$$

(maximum 0·193PL if $b_1 = 0·577$)

$$M_M = \frac{Pb}{2}(2 - 3b_1 + b_1^3)$$

(maximum 0·174PL if $b_1 = 0·366$)

$$R_R = \frac{1}{2}\frac{Pa^2}{L^3}(b_1 + 2)$$

$$\delta m = \frac{Pa^3b^2}{12EI\,L^3} \times (4L - a)$$

$b_1 = \frac{b}{L}$

$$M_L = -\frac{1}{3}PL$$

$$M_M = \frac{1}{9}PL$$

$$M_N = \frac{2}{9}PL$$

$$R_L = \frac{4}{3}P$$

$$R_R = \frac{2}{3}P$$

$$\delta_{max} = 0·0152\,\frac{PL^3}{EI}$$

at $x = 0·577L$

$$M_L = -\frac{19PL}{48}$$

$$M_N = \frac{21PL}{96}$$

$$M_P = \frac{53PL}{288}$$

$$R_L = \frac{91P}{48}$$

$$R_R = \frac{53P}{48}$$

$$\delta_{max} = 0·0169\,\frac{PL^3}{EI}$$

عندما تكون $x = 0·577L$

$$M_L = -\frac{WL}{8}$$

$$M_{max} = \frac{9WL}{128} \text{ at } x_1 = \frac{3}{8}$$

$M = 0$ at $x_1 = \frac{1}{4}$

$R_L = \frac{5}{8}W$

$R_R = \frac{3}{8}W$

عندما : $m = \frac{1}{3} - x_1$

$$\delta = \frac{WL^3}{48EI} \times (m - 3m^3 + 2m^4)$$

$$\delta_{max} = \frac{WL^3}{185EI}$$

at $x_1 = 0·5785$

$x_1 = \frac{x}{L}$

أيّ حمولة متماثلة

عندما تكون (A_s) هي مساحة مخطط عزم انعطاف الطرف الحر ، يكون :

$$M_L = \frac{3A_s}{2L}$$

$$R_L = \frac{W}{2} + \frac{M_L}{L}$$

$$R_R = \frac{W}{2} - \frac{M_L}{L}$$

تكون قيمة (δ) أعظميّة عند النقطة (x) ، حيث المساحة (Q) تساوي المساحة (R)

$$\delta_{max} = \frac{\text{(S) المساحة} \times X \times d}{EI}$$

مركز ثقل المساحة (S)

$$M_L = -\frac{3}{16}PL$$

$$M_M = \frac{5}{32}PL$$

$$R_L = \frac{11}{16}P$$

$$R_R = \frac{5}{16}P$$

$$\delta_m = \frac{7PL^3}{768EI}$$

$$\delta_{max} = 0·00932\,\frac{PL^3}{EI}$$

at $x = 0·553L$



